



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI MPPT BERBASIS
ALGORITMA *MODIFIED INCREMENTAL*
CONDUCTANCE UNTUK *PHOTOVOLTAIC* DENGAN
PERUBAHAN IRADIASI MATAHARI YANG CEPAT**

Ramadhan Muhammad Hakim
NRP 07111440000126

Dosen Pembimbing
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI MPPT BERBASIS
ALGORITMA *MODIFIED INCREMENTAL*
CONDUCTANCE UNTUK *PHOTOVOLTAIC* DENGAN
PERUBAHAN IRADIASI MATAHARI YANG CEPAT**

Ramadhan Muhammad Hakim
NRP 0711144000126

Dosen Pembimbing
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MODIFIED
INCREMENTAL CONDUCTANCE BASED MPPT FOR
PHOTOVOLTAIC UNDER FAST-VARYING SOLAR
IRRADIANCE**

Ramadhan Muhammad Hakim
NRP 07111440000126

Supervisors

Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul “**DESAIN DAN IMPLEMENTASI MPPT BERBASIS ALGORITMA *MODIFIED INCREMENTAL CONDUCTANCE* UNTUK *PHOTOVOLTAIC* DENGAN PERUBAHAN IRADIASI MATAHARI YANG CEPAT**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2018

Ramadhan Muhammad Hakim
07111440000126

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI MPPT BERBASIS
ALGORITMA *MODIFIED INCREMENTAL*
CONDUCTANCE UNTUK PHOTOVOLTAIC DENGAN
PERUBAHAN IRADIASI MATAHARI YANG CEPAT**

TUGAS AKHIR


Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

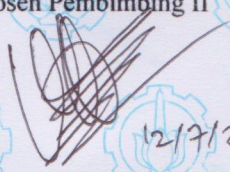
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198006032006041003


Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 198208292006042001



Halaman ini sengaja dikosongkan

DESAIN DAN IMPLEMENTASI MPPT BERBASIS ALGORITMA *MODIFIED INCREMENTAL* *CONDUCTANCE* UNTUK *PHOTOVOLTAIC* DENGAN PERUBAHAN IRADIASI MATAHARI YANG CEPAT

Nama mahasiswa : Ramadhan Muhammad Hakim
Dosen Pembimbing I : Heri Suryoatmojo S.T., MT., Ph.D.
Dosen Pembimbing II : Vita Lystianingrum S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstrak:

Photovoltaic (PV) pada masa kini menjadi salah satu sumber energi terbarukan yang sangat populer karena tidak membutuhkan biaya perawatan yang besar dan juga bebas emisi. Salah satu penerapan PV yaitu pada kendaraan listrik modern. Selain itu, PV juga dipasang pada kendaraan tanpa awak seperti pada *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) dan mobil bertenaga surya. PV sendiri memiliki karakteristik daya tertentu. Oleh karena itu dibutuhkan suatu metode untuk mengoptimalkan daya yang dikeluarkan oleh PV. Metode ini dinamakan MPPT (Maximum Power Point Tracking). MPPT merupakan serangkaian konverter DC-DC yang dapat mengkondisikan tegangan kerja dari PV agar dapat mencapai daya maksimum. Pada kasus aplikasi pada UAV, PV mengalami perubahan iradiasi cahaya matahari yang cepat dikarenakan sifat mobilitas dari UAV itu sendiri. Hal ini menyebabkan perlunya implementasi metode MPPT dengan konvergensi yang cepat agar selalu tercapai daya maksimum di setiap kondisi iradiasi. Pada penelitian ini dirancang sebuah MPPT dengan metode *Incremental Conductance* yang dimodifikasi dengan faktor koreksi yang didapat dari nilai konduktansi PV. Dari hasil pengujian perubahan iradiasi dan perubahan beban didapatkan bahwa algoritma *Mod-Inc* memiliki efisiensi yang lebih tinggi daripada algoritma *hill climbing*.

Kata kunci: MPPT, *Incremental Conductance*, *Photovoltaic*, *DC-DC Converter*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MODIFIED INCREMENTAL CONDUCTANCE BASED MPPT FOR PHOTOVOLTAIC UNDER FAST-VARYING SOLAR IRRADIANCE

Student Name : Ramadhan Muhammad Hakim
Supervisor I : Heri Suryoatmojo S.T., MT., Ph.D.
Supervisor II : Vita Lystianingrum S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstract:

Photovoltaic (PV) has become one of the most popular renewable energy sources due to its low maintenance and emission free characteristics. PV has been applied on many fields such as solar generating system and electric vehicle. In addition, PV has also been used to power UAV (Unmanned Aerial Vehicle) and solar powered vehicle. However, PV has a unique voltage versus power characteristic. Therefore, in order to obtain maximum power from PV, it must be operated on the V_{mpp} (maximum power point voltage). A DC-DC converter with an algorithm (MPPT) is implemented to control the voltage of PV. PV installed on solar vehicle or UAV, undergoes a fast-varying solar irradiance due to its mobility. Due to this condition, a fast MPPT algorithm is necessary. In this project, an MPPT with modified incremental conductance is implemented. The result shows that the proposed algorithm reacts faster than conventional algorithm in fast changing solar irradiance. Result shows that the modified incremental conductance algorithm, compared to hill climbing algorithm, has better performance in changing irradiance, changing load and battery charging testing.

Key Word: MPPT, *Incremental Conductance*, *Photovoltaic*, *DC-DC Converter* MPPT, *Incremental Conductance*, *Photovoltaic*, *DC-DC Converter*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**DESAIN DAN IMPLEMENTASI MPPT BERBASIS ALGORITMA *MODIFIED INCREMENTAL CONDUCTANCE* UNTUK *PHOTOVOLTAIC* DENGAN PERUBAHAN IRADIASI MATAHARI YANG CEPAT**”.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu dan Bapak penulis atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga selalu diberi kesehatan dan kebahagiaan.
2. Bapak Heri Suryoatmojo dan Ibu Vita Lystianingrum selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
3. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
4. Teman-teman asisten Laboratorium Konversi Energi yang memberi motivasi dan semangat selama pengerjaan tugas akhir.
5. Teman-teman seperjuangan e54 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.

Penulis berharap penelitian pada tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi ilmu pengetahuan khususnya di bidang energi terbarukan.

Surabaya, Juni 2018

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan Tugas Akhir	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
1.7 Relevansi.....	4
BAB 2 TEKNOLOGI MAKSIMUM POWER POINT TRACKING UNTUK PHOTOVOLTAIC	5
2.1 Pesawat Tanpa Awak Tenaga Surya	5
2.2 Pemodelan Panel Surya.....	6
2.3 Buck Converter	7
2.4 MPPT (Maximum Power Point Tracking)	9
2.4.1 Metode <i>Fractional Open Circuit Voltage</i>	10
2.4.2 Algoritma <i>Particle Swarm Optimization</i>	11
2.4.3 Metode <i>Hill Climbing</i>	12
2.4.4 Algoritma Incremental Conductance (INC)	14
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1 Desain Buck Converter	17
3.2 Algoritma <i>Modified Incremental Conductance</i>	19

3.3	Simulasi	21
3.3.1	Simulasi Algoritma MPPT Iradiasi Berubah dan Beban Tetap	22
3.3.2	Simulasi Algoritma MPPT Iradiasi Tetap dan Beban Berubah	27
3.3.3	Simulasi MPPT pada Pengisian Baterai	30
3.4	Implementasi	33
3.4.1	Desain Rangkaian pada PCB	33
3.4.2	Desain Induktor	34
3.4.3	Komponen-Komponen pada MPPT	34
3.4.4	Pengujian Alat	37
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1	Pengujian Sensor Arus dan Tegangan	41
4.2	Kurva Karakteristik PV	42
4.3	Pengujian Rangkaian <i>Buck Converter</i>	43
4.4	Pengujian MPPT pada Perubahan Iradiasi	45
4.5	Pengujian MPPT pada Perubahan Beban	50
4.6	Perbandingan Simulasi dengan Implementasi	56
BAB 5	PENUTUP	57
5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran	57
	DAFTAR PUSTAKA	59
	LAMPIRAN	61
	BIODATA PENULIS	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema MPPT pada UAV bertenaga surya	5
Gambar 2.2 Rangkaian ekuivalen PV	7
Gambar 2.3 Kurva karakteristik PV pada tingkat iradiasi yang berbeda	7
Gambar 2.4 Kondisi rangkaian saat gelombang PWM berada di kondisi ON.....	8
Gambar 2.5 Kondisi rangkaian saat gelombang PWM berada di kondisi OFF	8
Gambar 2.6 Skema MPPT untuk PV	9
Gambar 2.7 Skema MPPT dengan algoritma <i>fractional open circuit</i> ...	11
Gambar 2.8 Efek <i>partial shading</i> pada PV	12
Gambar 2.9 Diagram alir algoritma <i>Hill climbing</i>	13
Gambar 2.10 Diagram alir algoritma <i>Incremental Conductance</i>	15
Gambar 3.1 Kurva karakteristik PV dengan daya maksimum 93.7 W..	20
Gambar 3.2 Grafik konduktansi terhadap tegangan PV	20
Gambar 3.3 Diagram alir Algoritma <i>Modified Incremental Conductance</i>	21
Gambar 3.4 Skema MPPT pada <i>software</i> Simulink.....	22
Gambar 3.5 Kurva karakteristik PV pada dua kondisi iradiasi	22
Gambar 3.6 Grafik daya dengan algoritma <i>hill climbing</i>	23
Gambar 3.7 Grafik <i>duty cycle</i> dengan algoritma <i>hill climbing</i>	24
Gambar 3.8 Grafik tegangan dengan algoritma <i>hill climbing</i>	24
Gambar 3.9 Grafik daya dengan algoritma <i>modified incremental conductance</i>	25
Gambar 3.10 Grafik <i>duty cycle</i> dengan algoritma <i>modified incremental conductance</i>	26
Gambar 3.11 Grafik tegangan PV dengan algoritma <i>modified incremental conductance</i>	26
Gambar 3.12 Grafik daya terhadap perubahan beban dengan algoritma <i>hill climbing</i>	27
Gambar 3.13 Grafik tegangan PV terhadap perubahan beban dengan algoritma <i>hill climbing</i>	28
Gambar 3.14 Grafik <i>duty cycle</i> terhadap perubahan beban dengan algoritma <i>hill climbing</i>	28
Gambar 3.15 Grafik daya terhadap waktu algoritma Mod-Inc	29

Gambar 3.16 Grafik <i>duty cycle</i> terhadap perubahan beban dengan algoritma Mod-Inc	29
Gambar 3.17 Grafik tegangan terhadap perubahan beban dengan algoritma Mod-Inc	30
Gambar 3.18 Kenaikan tegangan baterai ketika menggunakan MPPT dan tanpa MPPT	31
Gambar 3.19 Perbandingan daya PV tanpa MPPT dan dengan MPPT ..	32
Gambar 3.20 SOC pada baterai dengan MPPT (atas) dan tanpa MPPT (bawah)	32
Gambar 3.21 Perbandingan tegangan PV dengan MPPT dan tanpa MPPT	33
Gambar 3.22 Proses desain PCB pada <i>software</i> EAGLE	33
Gambar 3.23 Induktor tipe 0077548A7 (<i>Sumber</i> : https://www.acalbf.com)	34
Gambar 3.24 Arduino Nano (<i>Sumber</i> : https://store.arduino.cc/)	35
Gambar 3.25 Sensor tegangan dan arus pada MPPT	35
Gambar 3.26 Komponen <i>Optocoupler</i> FOD3182	36
Gambar 3.27 Rangkaian MPPT <i>layer</i> bawah dan atas	37
Gambar 3.28 Pengujian efisiensi <i>buck converter</i>	37
Gambar 3.29 Pengujian MPPT pada UAV	38
Gambar 3.30 PV untuk mengukur nilai iradiasi	38
Gambar 4.1 Kurva karakteristik PV pada UAV dengan masing-masing P_{mpp}	42
Gambar 4.2 Gelombang arus pada induktor	44
Gambar 4.3 Hasil pengujian efisiensi <i>buck converter</i>	44
Gambar 4.4 Nilai iradiasi pada pengujian perubahan iradiasi	45
Gambar 4.5 Grafik daya PV dengan algoritma <i>hill climbing</i>	46
Gambar 4.6 Grafik <i>duty cycle</i> pada pengujian perubahan iradiasi dengan algoritma <i>hill climbing</i>	47
Gambar 4.7 Grafik tegangan input PV terhadap perubahan iradiasi dengan algoritma <i>hill climbing</i>	47
Gambar 4.8 Grafik daya PV terhadap perubahan iradiasi dengan algoritma Mod-Inc	48
Gambar 4.9 Grafik <i>duty cycle</i> terhadap perubahan iradiasi dengan algoritma Mod-Inc	49

Gambar 4.10 Grafik tegangan PV pada perubahan iradiasi dengan algoritma Mod-Inc	49
Gambar 4.11 Perbandingan respon algoritma <i>hill climbing</i> dan Mod-Inc pada perubahan iradiasi.....	50
Gambar 4.12 Perubahan nilai resistansi pada pengujian perubahan beban	50
Gambar 4.13 Grafik daya terhadap perubahan beban algoritma <i>hill climbing</i>	51
Gambar 4.14 Tegangan input MPPT pada perubahan beban <i>hill climbing</i>	52
Gambar 4.15 Tegangan output MPPT saat perubahan beban	52
Gambar 4.16 Perubahan nilai <i>duty cycle</i> terhadap perubahan beban algoritma <i>hill climbing</i>	53
Gambar 4.17 Grafik daya terhadap perubahan beban algoritma Mod-Inc	53
Gambar 4.18 Grafik tegangan PV terhadap perubahan beban dengan algoritma Mod-Inc	54
Gambar 4.19 Grafik <i>duty cycle</i> terhadap perubahan beban dengan algoritma Mod-Inc	54
Gambar 4.20 Grafik tegangan output MPPT terhadap perubahan beban dengan algoritma Mod-Inc.....	55
Gambar 4.21 Perbandingan grafik daya terhadap waktu algoritma Mod-Inc dengan <i>hill climbing</i> pada pengujian perubahan beban.....	55

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Spesifikasi satu sel PV Sunpower Maxeon	17
Tabel 2 Spesifikasi desain <i>buck converter</i>	18
Tabel 2 Data pengujian akurasi sensor tegangan	41
Tabel 3 Data pengujian akurasi sensor arus	42
Tabel 4 Perbandingan simulasi dan implementasi MPPT	56

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PV saat ini menjadi sumber energi terbarukan yang paling banyak digunakan karena biaya perawatan yang murah, penggunaan mudah, dan tidak menghasilkan emisi [1]. Selain itu sumber energi berupa cahaya matahari bisa didapat di seluruh dunia dan tidak bergantung pada kondisi alam sehingga PV dapat diterapkan di mana saja. Namun, PV saat ini masih memiliki efisiensi yang rendah dan menghasilkan daya yang berbeda-beda pada setiap waktu. Oleh karena itu, pertimbangan yang harus dilakukan yaitu memaksimalkan energi yang didapat dari PV di berbagai kondisi. PV sendiri memiliki karakteristik tertentu dari daya yang dihasilkan. Karakteristik dari PV merupakan hubungan antara tegangan dengan daya yang dihasilkan. Ini berarti PV harus dioperasikan pada tegangan tertentu untuk mencapai titik daya maksimal. Kurva karakteristik yang menggambarkan hubungan antara tegangan dan daya PV ini berupa kurva non-linear sehingga dibutuhkan suatu metode atau algoritma khusus untuk mencari titik maksimal dari kurva tersebut. Umumnya digunakan metode dan alat yang dinamakan MPPT (Maximum Power Point Tracking).

MPPT merupakan sebuah alat berupa konverter DC-DC yang tegangannya dapat dikondisikan dengan algoritma tertentu. MPPT akan mengkondisikan tegangan PV agar beroperasi pada tegangan di mana dayanya maksimum. Terdapat beberapa algoritma konvensional yang umum digunakan di MPPT antara lain *hill climbing* dan Incremental Conductance. Metode ini memiliki kelebihan yaitu algoritmanya yang sederhana. Namun metode konvensional memiliki beberapa kekurangan yaitu akurasi dan waktu tracking yang relatif lama. Selain itu metode konvensional seperti *hill climbing* juga menghasilkan keluaran tegangan yang berosilasi yang berarti terdapat banyak rugi-rugi daya. Di samping metode konvensional juga terdapat metode-metode yang memanfaatkan kecerdasan buatan atau artificial intelligence seperti fuzzy logic, neural network, dan particle swarm optimization. Metode kecerdasan buatan memiliki akurasi tracking yang lebih baik dibandingkan metode konvensional, namun algoritmanya cenderung rumit dan menggunakan banyak kalkulasi. Hal ini menyebabkan perlunya penggunaan processor atau microcontroller yang canggih untuk mengoperasikan algoritma tersebut.

Salah satu penerapan PV yaitu pada kendaraan bersumber energi listrik seperti mobil listrik atau UAV (Unmanned Aerial Vehicle) [2]. PV yang dipasang pada UAV misalnya, akan mengalami kondisi iradiasi matahari yang berubah dengan sangat cepat karena sifat dari pergerakannya yang cepat. Iradiasi yang berubah menyebabkan daya maksimum dari PV juga berubah. Oleh karena itu, untuk mengikuti perubahan kondisi tersebut diperlukan MPPT dengan metode tracking yang cepat. Pada penelitian ini akan diteliti dan dibahas mengenai algoritma Incremental Conductance termodifikasi. Metode ini dapat mencapai titik maksimum daya PV bila dibanding dengan metode konvensional karena tidak hanya mengandalkan proses searching atau pencarian. Hasil yang didapat dari MPPT dengan metode termodifikasi ini akan dibandingkan dengan metode konvensional yaitu *hill climbing*.

1.2 Permasalahan

PV pada kendaraan listrik seperti UAV mengalami perubahan iradiasi yang sangat cepat. Hal ini dikarenakan sifat mobilitas dan manuver dari UAV tersebut. Pada kondisi tersebut, agar PV dapat selalu menghasilkan daya maksimum, maka dibutuhkan MPPT dengan kecepatan *tracking* yang tinggi.

Di samping itu, UAV memiliki ukuran yang relatif kecil. Karena adanya keterbatasan ukuran, payload atau beban yang dapat dibawa juga terbatas. Selain itu, dimensi ruang kosong yang terdapat pada UAV juga kecil. Kondisi ini menyebabkan ukuran konverter yang digunakan harus menyesuaikan ukuran dari UAV yang kecil.

1.3 Tujuan Tugas Akhir

Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk:

1. Mendesain dan mengimplementasikan MPPT dengan algoritma Incremental Conductance yang termodifikasi dengan kecepatan tracking yang tinggi.
2. Mendapatkan perbandingan antara algoritma Incremental Conductance dan *hill climbing* dengan menganalisa daya dan kecepatan tracking.
3. Mendesain dan merancang alat dengan ukuran yang sesuai dengan ukuran UAV.

1.4 Batasan Masalah

1. Desain dari MPPT diuji langsung menggunakan PV yang terpasang pada UAV dengan daya total maksimum sebesar 80 W.
2. Pengukuran iradiasi menggunakan PV lain dengan daya kecil.
3. Beban direpresentasikan dengan resistor variabel yang resistansinya diubah untuk mendapatkan perubahan daya.
4. Analisa dan perhitungan dilakukan pada kondisi ideal.

1.5 Metodologi

Penelitian ini akan dilakukan dalam beberapa langkah yaitu sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Studi literatur bertujuan untuk mempelajari skema MPPT dan algoritma yang digunakan. Skema, perhitungan, dan pertimbangan dari pemilihan konverter DC-DC juga dipelajari dari jurnal dan publikasi terkait.
2. Simulasi
Tahap simulasi merupakan tahap pengujian awal algoritma yang akan diimplementasikan sebelum diterapkan pada alat. Simulasi juga bertujuan untuk mengetahui dan membandingkan kecepatan tracking algoritma MPPT yang akan digunakan.
3. Desain dan Implementasi Alat
Untuk merealisasikan MPPT menjadi alat, maka perlu didesain rangkaian konverter DC-DC dan program algoritmanya terlebih dahulu. Rangkaian konverter didesain dengan software Eagle lalu dicetak di sebuah PCB (printed circuit board). Algoritma dari MPPT diimplementasikan dengan program pada mikrokontroler Arduino Nano.
4. Pengujian Alat
MPPT yang sudah direalisasikan diuji secara langsung pada PV yang terpasang pada UAV dengan beban motor BLDC dan beban resistif. Tahap ini bertujuan untuk membuktikan kecepatan dan algoritma yang digunakan secara langsung.
5. Analisis Data

Data yang didapatkan dari pengujian alat dianalisis apakah sudah mencapai tujuan yang diinginkan yaitu kecepatan *tracking* MPPT yang tinggi.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan Tugas Akhir ini terbagi atas lima bagian dan masing-masing bab terurai sebagai berikut:

BAB 1 Pendahuluan

Bab ini berisi penjelasan tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi Tugas Akhir ini.

BAB 2 Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi teori mengenai hal-hal yang berhubungan dengan Tugas Akhir ini seperti algoritma MPPT, konverter DC-DC, dan PV sesuai dengan literatur yang sudah dikaji.

BAB 3 Desain, Simulasi, dan Implementasi

Bab ini berisi mengenai perancangan sistem MPPT, simulasi dengan perangkat lunak MATLAB, dan tahap implementasi pada PV.

BAB 4 Pengujian dan Analisis Data

Bab ini berisi pengujian dan analisis data terhadap hasil pengujian rangkaian converter yang telah dibuat serta performa algoritma MPPT yang diteliti.

BAB 5 Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi kesimpulan dari analisis yang dilakukan dan berisi tentang saran untuk pengembangan selanjutnya.

1.7 Relevansi

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Menjadi referensi untuk perkembangan ilmu pengetahuan di bidang energi terbarukan.
2. Menjadi referensi bagi mahasiswa dalam penelitian di bidang serupa.

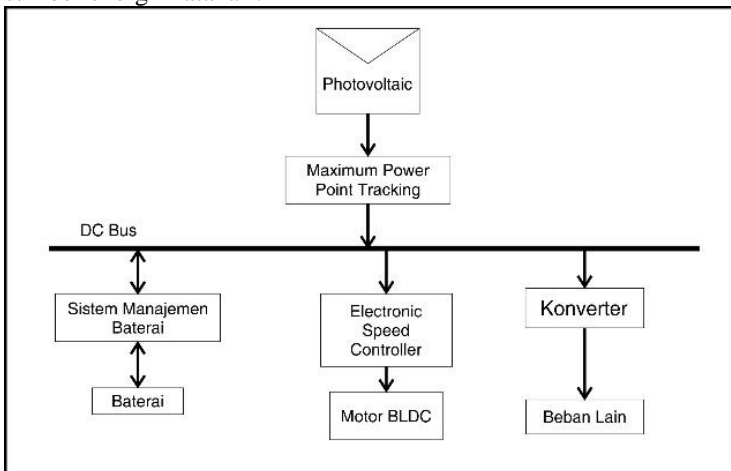
BAB 2

TEKNOLOGI MAKSIMUM POWER POINT TRACKING UNTUK PHOTOVOLTAIC

2.1 Pesawat Tanpa Awak Tenaga Surya

Pada masa kini, pengaplikasian PV atau panel surya sebagai energi terbarukan sangat luas. Salah satunya yaitu pada kendaraan bertenaga listrik. Kendaraan tenaga listrik dapat mengurangi emisi hingga 92 % bila dibanding dengan kendaraan konvensional yang menggunakan mesin bakar [2].

Penggunaan PV tidak hanya terbatas pada kendaraan listrik yang berada di darat, melainkan juga pada UAV atau pesawat tanpa awak. Teknologi UAV saat ini sedang dikembangkan dan dimanfaatkan di banyak bidang seperti pemetaan digital, mitigasi bencana, dan monitoring. Tujuan utama pengembangan UAV yang menggunakan PV yaitu melakukan penerbangan secara mandiri terus menerus dengan sumber energi matahari.



Gambar 2.1 Skema MPPT pada UAV bertenaga surya

Konsep pesawat tanpa awak bertenaga surya cukup sederhana, yaitu dengan memanfaatkan luasan sayap untuk menempatkan PV. PV sebagai sumber energi dihubungkan dengan sistem kelistrikan yang ada pada UAV seperti sistem pendorong dan sistem kontrol. Umumnya, UAV

bertenaga surya memerlukan baterai sebagai media penyimpan energi dikarenakan energi matahari tidak tersedia di waktu-waktu tertentu. Tentunya, untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi matahari dari PV, sebuah konverter atau MPPT perlu dihubungkan pada PV sebelum terhubung ke beban. Skema dari sistem UAV bertenaga surya tampak pada Gambar 2.1.

2.2 Pemodelan Panel Surya

Photovoltaic (PV) merupakan sebuah alat atau material yang dapat mengubah energi yang terkandung dalam foton cahaya menjadi listrik. PV menggunakan material semikonduktor untuk mengubah cahaya matahari menjadi listrik. Bahan penyusun dari PV hampir sama dengan jenis semikonduktor lainnya seperti dioda dan transistor.

Pemodelan sederhana sebuah PV ideal yaitu rangkaian yang terdiri dari dioda yang dipasang paralel dengan sebuah sumber arus. Sumber arus menghasilkan keluaran listrik (I_{ph}) ketika disinari cahaya. Pada pemodelan PV yang tidak ideal, terdapat komponen resistif seri (R_s) dan paralel (R_p). Resistansi seri menyebabkan drop tegangan pada sisi keluaran PV. R_p merepresentasikan adanya arus bocor yang menuju ground. Rangkaian ekuivalen PV tampak pada Gambar 2.2. Dari rangkaian tersebut, PV dapat dimodelkan secara matematis menggunakan persamaan:

$$I = I_{ph} - I_o \left(\exp \left(\frac{q(V + I.R_s)}{kT} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + I.R_s}{R_p} \right) \quad (2.1)$$

di mana,

I = Arus keluaran PV

I_{ph} = Arus hubung singkat PV

I_o = Arus saturasi PV

q = muatan elektron (1.602×10^{-19} coulombs)

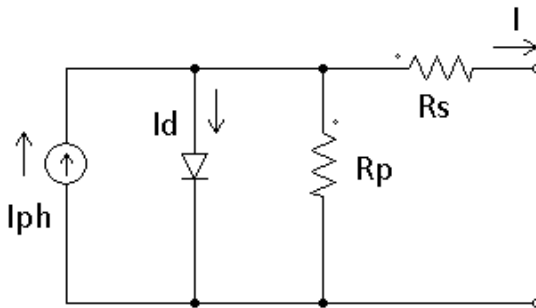
V = tegangan PV

k = konstanta Boltzmann ($1.38064852 \times 10^{-23}$)

T = suhu (Kelvin)

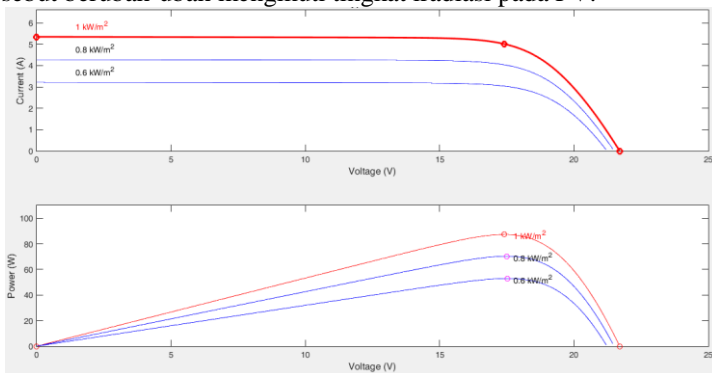
R_s = resistansi seri

R_p = resistansi paralel



Gambar 2.2 Rangkaian ekivalen PV

Dari pemodelan tersebut, PV memiliki karakteristik arus dan tegangan tertentu. Hubungan karakteristik arus dan tegangan tersebut digambarkan dalam kurva. Selain itu juga terdapat hubungan antara tegangan dan daya. Pada Gambar 2.2 terlihat bahwa PV menghasilkan daya yang berubah-ubah mengikuti tegangan operasi. Kurva daya dan tegangan memiliki satu puncak maksimum. Puncak maksimum kurva tersebut berubah-ubah mengikuti tingkat iradiasi pada PV.



Gambar 2.3 Kurva karakteristik PV pada tingkat iradiasi yang berbeda

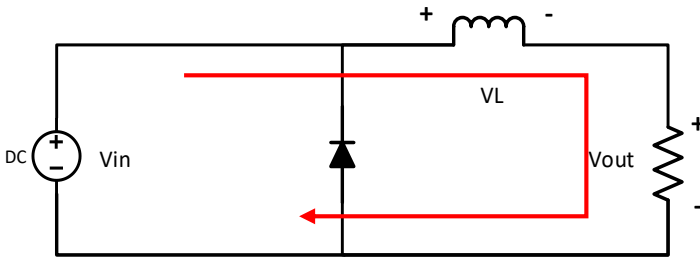
2.3 Buck Converter

Buck converter merupakan konverter DC-DC yang mengubah level tegangan keluaran lebih rendah daripada tegangan masukan. Buck converter menggunakan sistem pensaklaran untuk mencacah tegangan masukan sehingga tegangan keluaran menjadi lebih rendah. Pensaklaran dilakukan dengan memberikan sinyal PWM (pulse width modulation)

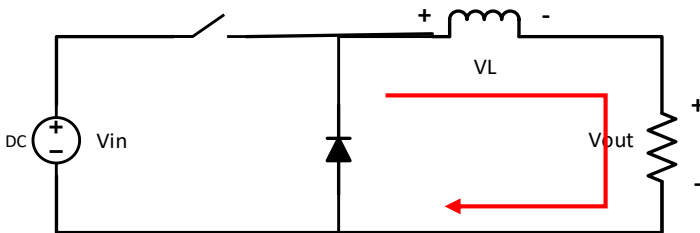
terhadap komponen pensaklaran. Pada Gambar 2.4. ketika sinyal PWM berada pada kondisi ON, maka arus akan mengalir langsung dari sumber DC ke beban. Dioda yang terpasang paralel mem-block aliran arus yang mengalir ke ground. Pada kondisi tersebut persamaan untuk tegangan keluaran V_{out} yaitu:

$$V_{in} = V_L + V_{out} \quad (2.2)$$

$$V_{in} = \frac{L \Delta I}{T_{on}} + V_{out} \quad (2.3)$$



Gambar 2.4 Kondisi rangkaian saat gelombang PWM berada di kondisi ON



Gambar 2.5 Kondisi rangkaian saat gelombang PWM berada di kondisi OFF

Kondisi berikutnya yaitu ketika saklar terbuka (OFF). Pada kondisi ini, induktor yang menyimpan arus dari kondisi ketika ON, akan mengalirkan arus ke beban dan membentuk closed loop melalui dioda. Persamaan pada kondisi ini yaitu,

$$\frac{L \Delta I}{T_{off}} = V_{out} \quad (2.4)$$

dengan menstubsitusikan persamaan 2.2 dan persamaan 2.3 didapatkan:

$$V_{in} = \frac{V_{out} \times T_{off}}{T_{on}} + V_{out} \quad (2.5)$$

$$V_{in} = V_{out} \times \left(\frac{T_{off}}{T_{on}} + 1 \right) \quad (2.6)$$

$$V_{in} = \frac{T_{off} + T_{on}}{T_{on}} V_{out} \quad (2.7)$$

Karena,

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (2.8)$$

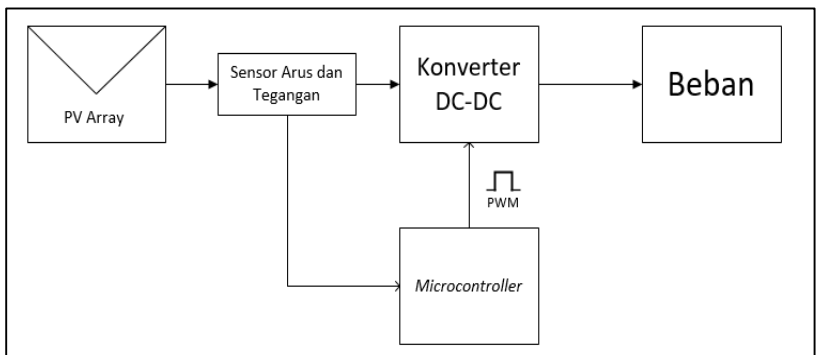
Maka,

$$V_o = D \times V_{in} \quad (2.9)$$

Perbandingan besaran tegangan input dan output bergantung pada nilai duty cycle yang dioperasikan. Duty cycle merupakan perbandingan antara waktu on dan periode dari gelombang PWM yang dioperasikan.

Pada sistem MPPT, komponen buck converter menjadi pengatur tegangan operasi PV. MPPT bekerja dengan algoritma tertentu yang mengatur duty cycle dari konverter agar tegangan PV selalu bekerja pada titik optimum.

2.4 MPPT (Maximum Power Point Tracking)



Gambar 2.6 Skema MPPT untuk PV

PV menjadi sumber energi terbarukan yang pada masa kini mulai banyak digunakan karena hanya membutuhkan sedikit perawatan (maintenance) dan juga tidak menghasilkan emisi. Namun, secara teknis, biaya pembangkitan daya dari PV masih relatif mahal dan efisiensinya rendah bila dibanding dengan sumber energi lainnya [3]. Maka dari itu, sangatlah penting untuk mengoptimalkan daya yang diserap dari PV.

Kurva karakteristik daya dan tegangan yang dimiliki PV berubah mengikuti suhu dan iradiasi matahari. Ketika terjadi perubahan kurva karakteristik tentunya titik optimal daya yang dihasilkan oleh PV juga berubah. Untuk memastikan agar PV selalu beroperasi pada daya optimal, sebuah metode yang dinamakan MPPT (Maximum Power Point). Algoritma MPPT umumnya digunakan pada sebuah konverter yang dapat mengatur tegangan kerja dari PV sehingga PV selalu menghasilkan daya yang optimum.

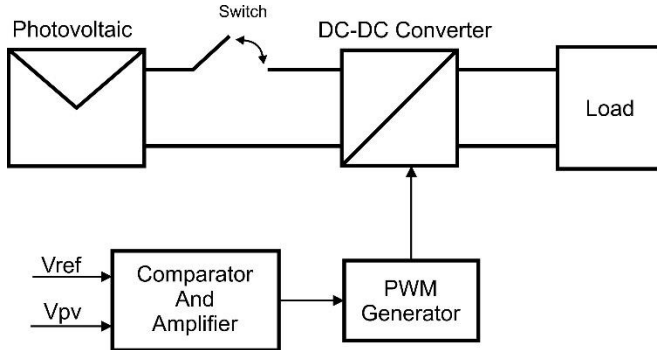
Terdapat beberapa algoritma MPPT yang digunakan. Pada [4], algoritma MPPT dibagi menjadi dua jenis yaitu *Direct Search Method* (DSM) dan *Module Integrated Algorithm* (MIA). *Direct Search Method* merupakan metode yang meliputi proses sampling kondisi dari PV yang digunakan seperti tegangan atau arus. Untuk itu metode ini memerlukan sensor. DSM memiliki kelebihan yaitu tidak dipengaruhi kondisi lingkungan di mana PV dioperasikan. Ini berarti bahwa DSM dapat tetap mengoperasikan PV pada daya maksimum tanpa terpengaruh perubahan kondisi lingkungan. Metode MIA menggunakan persamaan matematis dan permodelan modul PV yang digunakan. Metode ini lebih kompleks daripada metode DSM dan juga tidak independen terhadap kondisi lingkungan.

2.4.1 Metode Fractional Open Circuit Voltage

Metode *fractional open circuit voltage* (VOC) adalah salah satu metode MPPT yang bekerja dengan memanfaatkan karakteristik tegangan MPP dan *open circuit* dari PV. Tegangan MPP dan *open circuit* ini memiliki hubungan yang linear di setiap iradiasi dan suhu. Metode ini sangatlah sederhana karena hanya membutuhkan sensor tegangan dan tidak membutuhkan proses komputasi yang rumit sehingga tidak diperlukan kontroler yang canggih [5].

Algoritma ini bekerja dengan memutus aliran ke beban beberapa saat dan men-*sensing* tegangan *open circuit* PV secara berkala. Setelah itu ditentukan nilai V_{mpp} yang berkisar di antara 0.7-0.8 tegangan *open circuit* (V_{oc}). Nilai tegangan yang sudah ditentukan menjadi referensi

bagi konverter untuk mengatur tegangan PV. Tampak pada Gambar 2.7 Skema MPPT dengan algoritma *fractional open circuit* skema MPPT dengan metode tersebut menggunakan saklar yang dibuka tutup secara berkala.

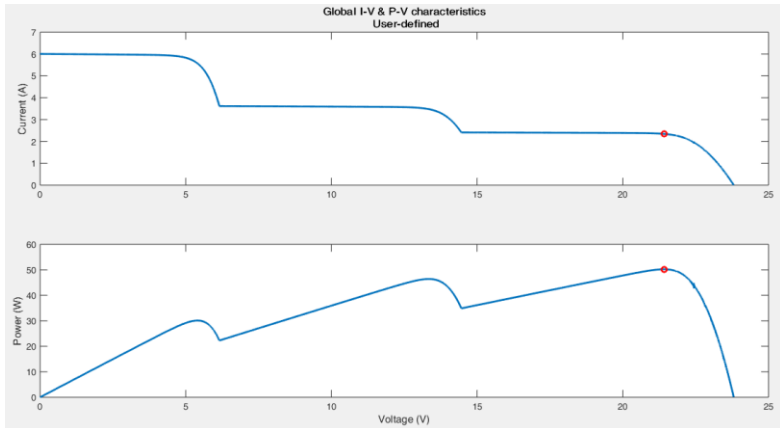


Gambar 2.7 Skema MPPT dengan algoritma *fractional open circuit*

Algoritma *fractional open circuit* ini memiliki beberapa kekurangan, salah satunya adalah rugi-rugi energi ketika PV diputus dari beban. Proses pemutusan ini menyebabkan terdapat daya yang tidak mengalir ke beban untuk beberapa saat. Kelemahan lain dari algoritma ini yaitu sulitnya penentuan durasi di antara dua proses *sampling*. Jika durasi *sampling* terlalu lama, maka akan terdapat daya yang hilang ketika terjadi perubahan iradiasi atau suhu sementara V_{mpp} belum ter-*update*. Jika durasi *sampling* terlalu cepat, maka daya yang hilang akibat pemutusan beban semakin besar.

2.4.2 Algoritma Particle Swarm Optimization

Algoritma *Particle Swarm Optimization* (PSO) adalah salah satu algoritma berbasis *artificial intelligence* atau kecerdasan buatan yang dapat digunakan untuk mengoptimasi daya pada PV. Cara kerja algoritma ini meniru perilaku sosial kawanan hewan [6]. Algoritma ini dimulai dengan menghasilkan beberapa partikel yang akan menjadi kandidat solusi. Partikel-partikel ini akan mencari solusi yang terbaik pada dimensi yang sudah ditentukan. Jumlah dari partikel menentukan akurasi optimasi. Namun semakin banyak partikel, semakin panjang durasi yang dibutuhkan dalam satu iterasi.



Gambar 2.8 Efek *partial shading* pada PV

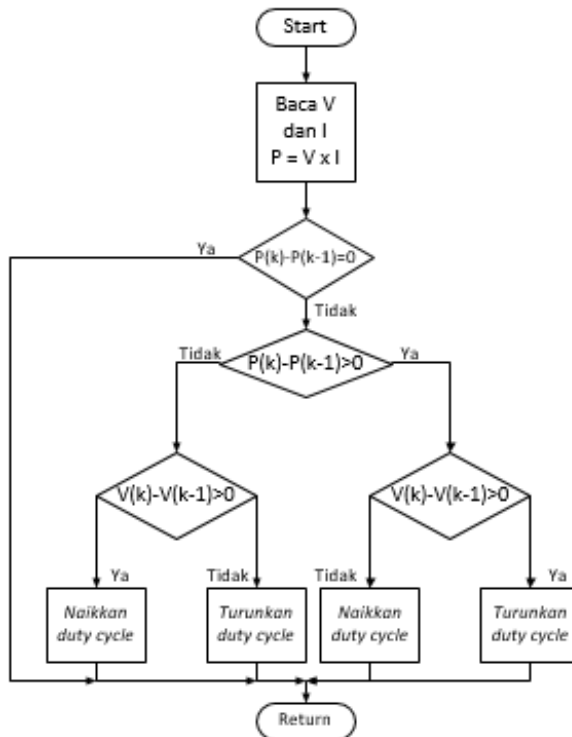
Salah satu kelebihan dari algoritma PSO adalah kemampuannya dalam mengoptimasi daya PV dengan efek *partial shading*. Efek *partial shading* adalah kondisi di mana sekumpulan PV atau PV array mendapatkan iradiasi matahari yang berbeda. Pada Gambar 2.8 tampak bahwa kurva PV dengan *partial shading* memiliki beberapa puncak dengan satu puncak maksimum. Efek *partial shading* ini tidak dapat diatasi dengan algoritma konvensional seperti *hill climbing* karena rentan terjebak pada puncak lokal selama proses *tracking*.

Algoritma ini memiliki kelemahan bila dibanding dengan algoritma konvensional yaitu kecepatan *tracking* yang lebih lama. Untuk mengatasi hal ini maka diperlukan mikrokontroler yang canggih untuk mengimplementasikan algoritma ini.

2.4.3 Metode Hill Climbing

Metode *Hill climbing* adalah metode MPPT di mana sebuah kontroler mengatur *duty cycle* dari konverter berdasarkan perubahan daya dan tegangan PV. Metode ini banyak digunakan pada MPPT karena sederhana dan dapat diimplementasikan pada berbagai jenis PV tanpa perlu mengetahui model matematisnya. *Hill climbing* dimulai dengan mengubah *duty cycle* dari konverter hingga tegangan kerja dari PV naik. Apabila dengan kenaikan tegangan juga diikuti dengan kenaikan daya, maka *duty cycle* akan diperbarui terus ke arah yang sama. Namun apabila kenaikan tegangan menyebabkan daya menurun, maka *duty cycle*

diperbarui ke arah yang berlawanan. Alur kerja algoritma *hill climbing* tampak pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Diagram alir algoritma *Hill climbing*

Seperti terlihat pada diagram alir, algoritma *hill climbing* cukup sederhana sehingga algoritma ini tidak membutuhkan prosesor yang canggih agar dapat berjalan. Namun, algoritma *Hill climbing* memiliki kekurangan yaitu terdapat osilasi *steady-state* pada titik puncak kurva maksimum PV. Osilasi ini terjadi dikarenakan penambahan pengurangan *duty cycle* sehingga nilai tegangan berubah-ubah. Tegangan yang berubah-ubah ini menyebabkan PV tidak benar-benar beroperasi pada titik maksimum daya. Osilasi tersebut dapat dikurangi dengan memperkecil nilai kenaikan atau penurunan *duty cycle*. Namun, nilai yang kecil menyebabkan proses *tracking* yang lebih lama.

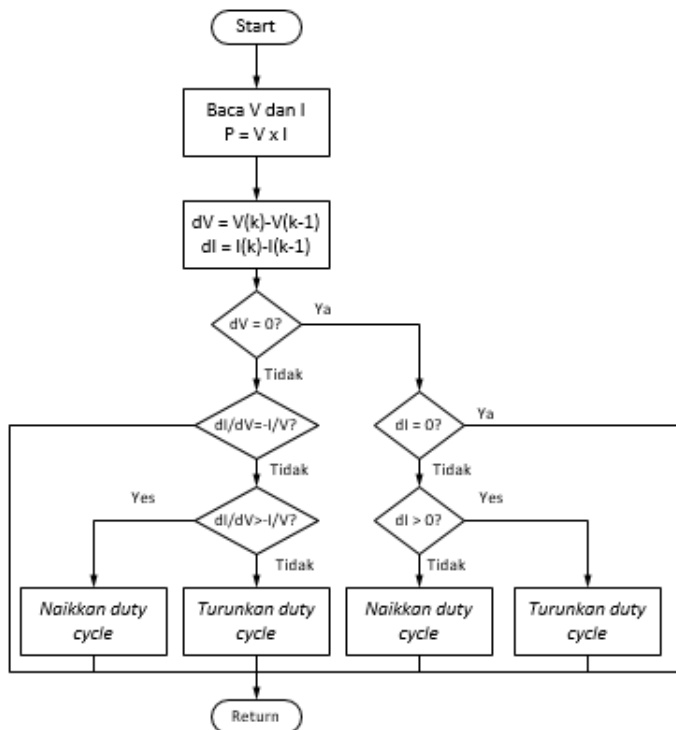
Di samping osilasi pada titik maksimum, algoritma *hill climbing* juga rentan mengalami pergeseran titik maksimum ketika terjadi perubahan iradiasi yang cepat. Sebagai contoh, ketika *duty cycle* dinaikkan bersamaan dengan perubahan iradiasi yang meningkat, maka algoritma akan membaca bahwa kenaikan daya tersebut menuju titik maksimum kurva. Padahal sebenarnya perubahan tersebut dikarenakan iradiasi yang meningkat yang menyebabkan peningkatan daya. Hal ini dapat menyebabkan kegagalan algoritma dalam mencari titik MPP.

2.4.4 Algoritma Incremental Conductance (INC)

Algoritma *incremental conductance* (INC) dikembangkan untuk menghindari kekurangan yang dimiliki oleh algoritma *hill climbing*. Algoritma INC dapat mencari MPP berdasarkan perbandingan antara kenaikan dan konduktansi sesaat dari PV [7]. Pada saat MPP, nilai dP (turunan daya) terhadap dV (turunan tegangan) bernilai nol. Pada kurva karakteristik PV, $dP/dV > 0$ ketika berada di sebelah kiri MPP dan $dP/dV < 0$ ketika berada di kanan MPP.

$$dP/dV = d(IV)/dV = I + V |dI/dV| \quad (2.10)$$

Algoritma INC dimulai dengan membaca tegangan dan arus PV. Lalu, untuk mendapatkan dP dan dV , tegangan dan daya yang terbaca pada iterasi sekarang dikurangi dengan tegangan dan daya pada iterasi sebelumnya. Nilai dari dP/dV dibandingkan dengan $-I/V$ sehingga ketika nilainya sama, maka nilai *duty cycle* dipertahankan untuk iterasi berikutnya. Untuk mendeteksi kenaikan atau penurunan nilai iradiasi dan temperature, algoritma memeriksa nilai dI yang berarti perubahan arus. Nilai *duty cycle* akan diubah berdasarkan nilai dI apakah $dI > 0$ atau $dI < 0$.



Gambar 2.10 Diagram alir algoritma *Incremental Conductance*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai metode, desain, dan perhitungan yang digunakan pada penelitian ini. Metodologi meliputi simulasi sistem MPPT dengan *software* MATLAB, desain dan implementasi *buck converter*, dan pengujian sistem yang diimplementasi.

3.1 Desain Buck Converter

PV yang terpasang pada UAV yaitu Sunpower Maxeon Solar Cell C-60. PV yang terpasang berjumlah 28 sel yang terhubung seri, dengan spesifikasi masing-masing sel pada Tabel 1. Dengan 28 sel yang terhubung secara seri maka PV akan memiliki V_{mpp} total sebesar 16 V dan tegangan maksimum atau *open circuit* V_{oc} sebesar 20 V. Daya puncak total dari rangkaian PV tersebut yaitu 93.52 W pada iradiasi 1000 W/m² pada suhu 25 °C.

Tabel 1 Spesifikasi satu sel PV Sunpower Maxeon

Efisiensi (%)	21.8
P_{mpp} (W)	3.34
V_{mpp} (V)	0.574
I_{mpp} (A)	5.83
V_{oc} (V)	0.682
I_{sc} (A)	6.24

Berdasarkan spesifikasi PV tersebut maka dapat dihitung parameter untuk desain *buck converter*. Pertama ditentukan nilai *ripple* dari tegangan output yaitu sebesar 5 % sehingga nilai ΔV_C adalah 0.682 V. Selanjutnya yaitu nilai dari *ripple* arus. Nilai *ripple* arus mempengaruhi desain induktor yang digunakan. *Ripple* arus ditentukan sebesar 30 % sehingga ΔI_L adalah sebesar 3.75 A. Nilai *duty cycle* konverter ditentukan berdasarkan nilai tegangan input dan output. Tegangan input adalah tegangan MPP dari PV yaitu 16 V sementara tegangan output yaitu tegangan baterai bernilai 8 V sehingga *duty cycle* adalah 0.5.

Beberapa parameter penting yang harus diperhatikan dalam mendesain *buck converter* yaitu tegangan masukan nominal, tegangan keluaran nominal, arus keluaran maksimum, dan IC yang digunakan dalam *buck converter* [10]. *Buck converter* dipilih karena tegangan keluaran konverter lebih rendah daripada tegangan masukan yang berasal

dari PV ketika berada pada V_{mpp} dengan kondisi iradiasi tertinggi [11]. Keluaran dari converter direncanakan berupa baterai Li-Po 2 Sel yang memiliki tegangan minimal sebesar 7.4 V.

Tabel 2 Spesifikasi desain *buck converter*

P (W)	100
V_{input} (V)	16
V_{output} (V)	8
I_{output} (A)	12.5
ΔV_C (V)	0.682
ΔI_L (A)	3.75
Duty Cycle (k)	0.5

Berikutnya dilakukan perhitungan nilai induktor yang digunakan. Untuk menghitung nilai induktor maka perlu ditentukan terlebih dahulu frekuensi *switching* dan *ripple* arus yang diinginkan. Frekuensi yang digunakan yaitu 50 kHz dengan *ripple* arus sebesar 30% Nilai induktor untuk *buck converter* digambarkan pada persamaan di bawah ini;

$$L = \frac{V_{out} \times (V_{in} - V_{out})}{\Delta I_L \times f_s \times V_{in}} \quad (3.1)$$

$$L = \frac{8 \times (16 - 8)}{3.75 \times 50000 \times 16} \quad (3.2)$$

$$L = 21.3 \mu H \quad (3.3)$$

Berikutnya dilakukan perhitungan kapasitor. Kapasitor berfungsi untuk membatasi *ripple* tegangan keluaran yang disebabkan oleh *switching*. Pada penelitian ini diinginkan riak tegangan sebesar 0.5. Persamaan nilai kapasitor yaitu,

$$C = (V_{out} + \Delta V) \frac{(1-k)}{R \times f_s \times \Delta V} \quad (3.4)$$

$$C = (8 + 0.682) \frac{0.5}{0.64 \times 50000 \times 0.682} \quad (3.5)$$

$$C = 198 \mu F \quad (3.6)$$

Dengan nilai tersebut maka nilai kapasitor yang dipilih yaitu yang tersedia di pasaran yaitu 220 μF .

3.2 Algoritma *Modified Incremental Conductance*

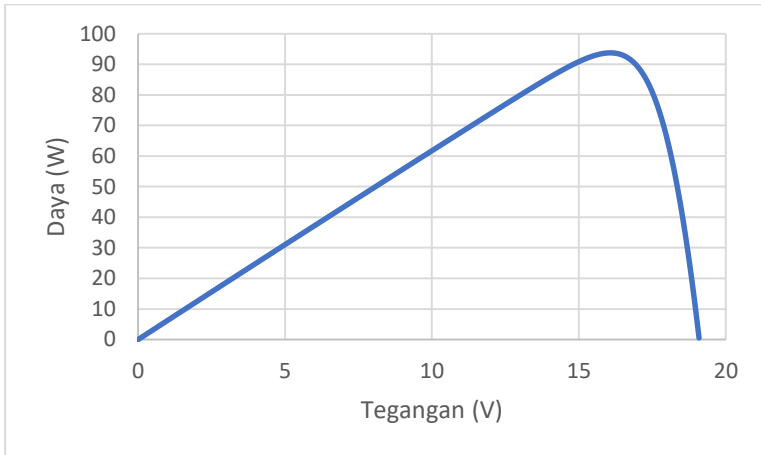
Algoritma *Incremental Conductance* dapat memperbaiki beberapa kekurangan yang dimiliki oleh algoritma *hill climbing* seperti osilasi di sekitar MPP dan akurasi *tracking* pada kondisi perubahan iradiasi. Namun, algoritma INC masih memiliki beberapa kekurangan yaitu kecepatan *tracking* yang lambat dan osilasi di sekitar MPP walaupun bernilai kecil. Selain itu, kecepatan *tracking* dan akurasi MPP juga terpengaruh dari nilai kenaikan *duty cycle* yang ditetapkan [8].

Nilai konduktansi sesaat selalu bernilai positif, sedangkan nilai kenaikan konduktansi selalu bernilai negatif pada setiap tegangan operasi PV. Konduktansi PV (G) bernilai besar ketika berada di titik yang jauh dari MPP dan semakin mengecil ketika mendekati MPP. Sifat ini dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan performa algoritma INC [9].

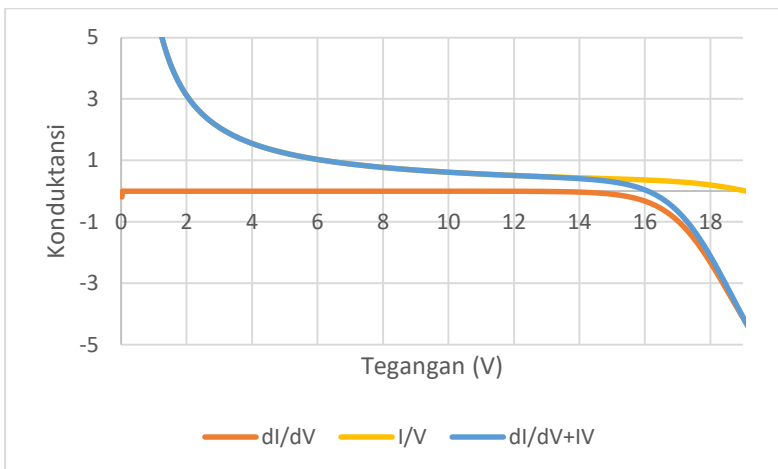
Sebagai contoh, PV yang digunakan pada penelitian ini memiliki kurva karakteristik pada Gambar 3.1 ketika iradiasi bernilai 1000 W/m^2 . PV tersebut memiliki daya maksimum 93.7 W pada tegangan 16 V. PV memiliki grafik konduktansi terhadap tegangan pada Gambar 3.2. Dapat diamati bahwa pada grafik tersebut, nilai konduktansi (I/V) pada setiap tegangan operasi PV bernilai positif sedangkan nilai *incremental conductance* (dI/dV) bernilai nol ketika tegangan operasi berada di bawah tegangan MPP dan bernilai negatif ketika tegangan operasi berada di atas tegangan MPP. Kedua nilai tersebut dapat ditambahkan menjadi ($dI/dV + I/V$) dan menghasilkan kurva kontinyu. Terlihat pada kurva tersebut bahwa semakin jauh tegangan operasi PV dari tegangan MPP, maka nilainya semakin besar.

Sifat konduktansi tersebut dimanfaatkan sebagai faktor koreksi nilai *duty cycle* pada MPPT. Dengan menggunakan faktor koreksi ini, impuls yang disebabkan oleh perubahan iradiasi yang cepat dapat dikurangi. Selain itu osilasi yang terjadi di sekitar MPP juga berkurang. Nilai *duty cycle* pada iterasi k dengan faktor koreksi digambarkan pada Persamaan 2.11. Nilai ($dI/dV + I/V$) dikalikan dengan konstanta tertentu (N) untuk menyesuaikan dengan rentang nilai *duty cycle*. Dengan faktor koreksi tersebut, algoritma akan menambah *duty cycle* dengan nilai yang lebih besar ketika jauh dari MPP dan semakin mengecil ketika sudah mencapai MPP, sehingga proses *tracking* semakin cepat dan osilasi pada MPP berkurang.

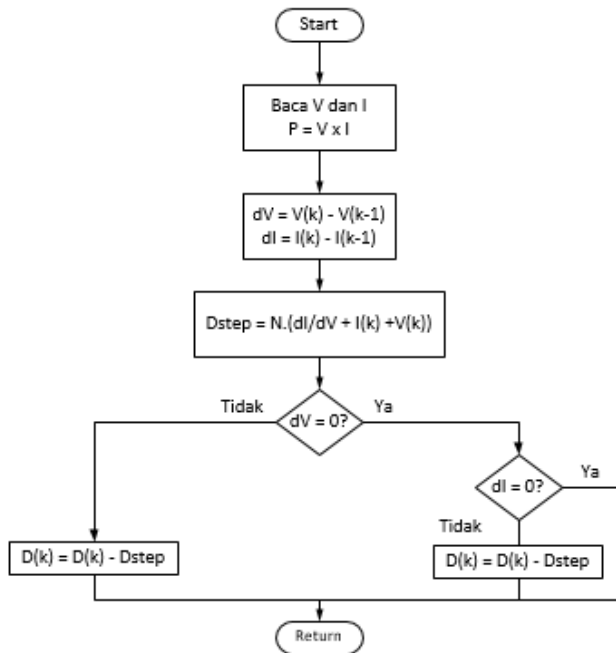
$$D_k = D_{k-1} - N\left(\frac{dl}{dv} + \frac{l}{v}\right) \quad (2.11)$$



Gambar 3.1 Kurva karakteristik PV dengan daya maksimum 93.7 W



Gambar 3.2 Grafik konduktansi terhadap tegangan PV

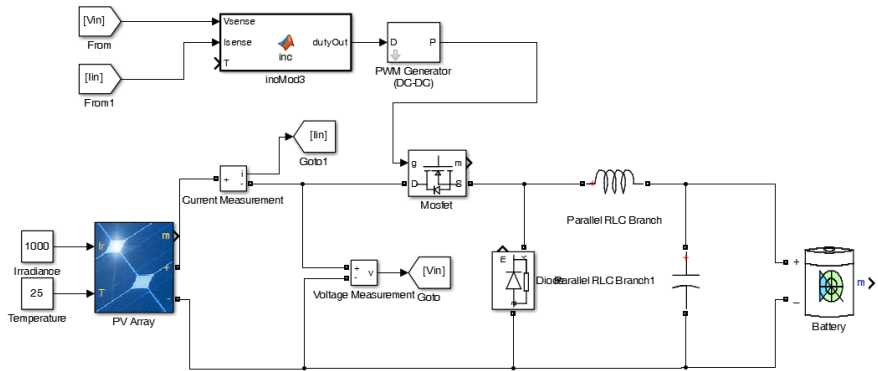


Gambar 3.3 Diagram alir Algoritma *Modified Incremental Conductance*

3.3 Simulasi

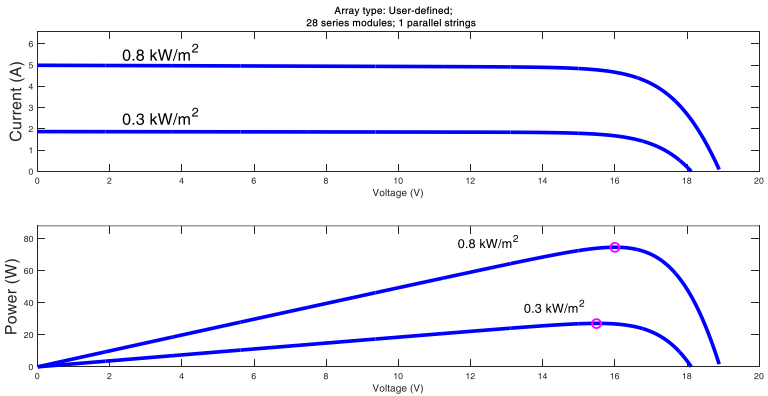
Dari desain rangkaian yang sudah dibahas pada sub bab sebelumnya, dilakukan simulasi dengan *software* Simulink untuk menguji rangkaian dan algoritma apakah sudah sesuai dengan yang diinginkan. Komponen dirangkai dengan *software* tersebut seperti yang tampak pada Gambar 3.4. Pada simulasi tersebut digunakan blok *Matlab Function* untuk menjalankan algoritma MPPT. Blok tersebut merepresentasikan mikrokontroler pada implementasi.

PV yang digunakan menggunakan block PV array yang disediakan oleh Matlab. Parameter blok tersebut dapat diatur sesuai spesifikasi PV yang diinginkan. Dari parameter yang sudah diatur, kurva karakteristik PV pada setiap iradiasi dapat diplot.



Gambar 3.4 Skema MPPT pada *software* Simulink

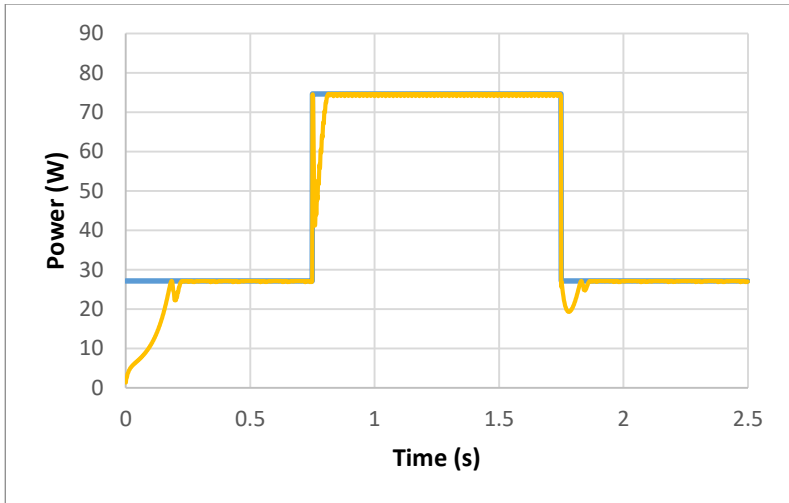
3.3.1 Simulasi Algoritma MPPT Iradiasi Berubah dan Beban Tetap



Gambar 3.5 Kurva karakteristik PV pada dua kondisi iradiasi

Algoritma *Modified Incremental Conductance* (Mod-Inc) dan *Hill Climbing* pertama disimulasikan dengan beban tetap. Suhu pada PV diasumsikan konstan pada 25° . Iradiasi diubah dari 300 W/m^2 menjadi 800 W/m^2 pada detik ke 1.75 lalu turun kembali menjadi 300 W/m^2 pada detik ke 0.75. Dengan perubahan iradiasi seperti ini algoritma dapat teruji pada kondisi ketika naik maupun turun. Berdasarkan kurva di atas, daya

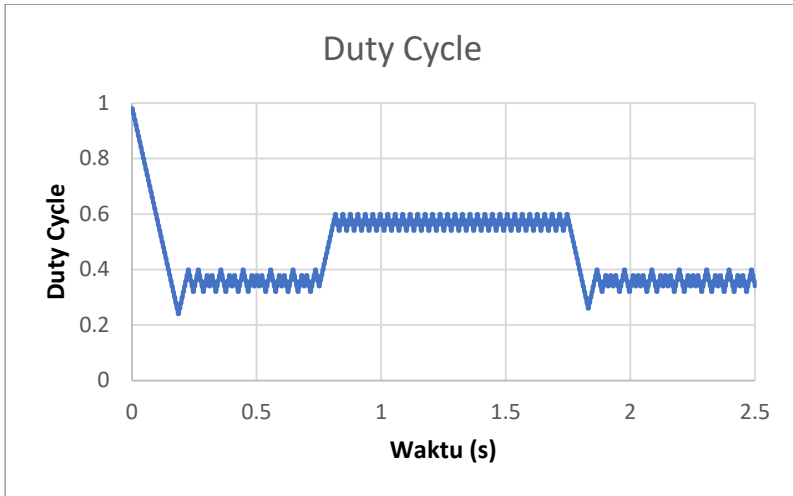
maksimum yang dibangkitkan PV saat iradiasi 300 W/m² yaitu 27.13 Watt dan 74.66 Watt saat iradiasi 800 W/m².



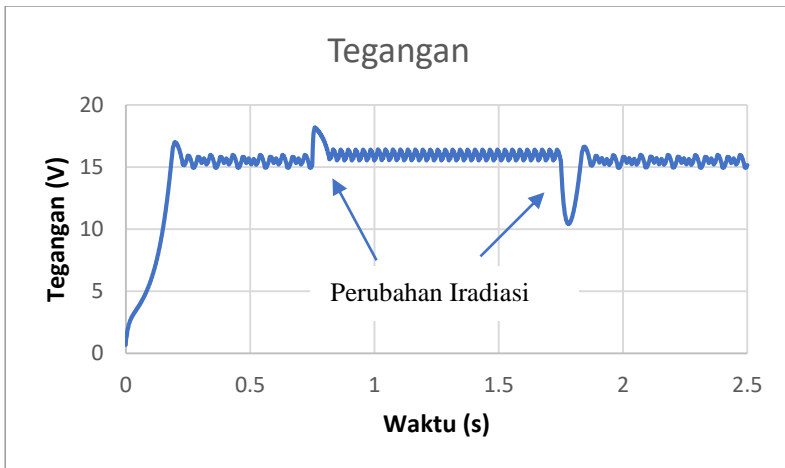
Gambar 3.6 Grafik daya dengan algoritma *hill climbing*

Berdasarkan grafik pada Gambar 3.6, algoritma *hill climbing* dapat mencapai titik MPP. Namun, terdapat osilasi pada kondisi *steady state* dan waktu *tracking* yang cukup lama. Total energi yang dihasilkan oleh PV dengan MPPT algoritma *hill climbing* yaitu 110.88 Joule sedangkan total potensi energi yang dapat dihasilkan oleh PV yaitu 115.35 Joule sehingga energi yang dicapai yaitu 96.13 % dari energi maksimum dan terdapat energi yang hilang sebesar 3.87%.

Jika dilihat pada grafik *duty cycle*, maka akan tampak osilasi yang cukup besar. Nilai *duty cycle* selalu naik dan turun sebesar nilai *step* yang ditentukan yaitu 0.02. Dengan nilai *step* tersebut, osilasi daya yang dihasilkan tidak terlalu besar, namun waktu *tracking* yang dibutuhkan menjadi lebih lama. Pada grafik tegangan juga tampak osilasi yang cukup besar dan perubahan tegangan yang besar ketika terjadi perubahan iradiasi.



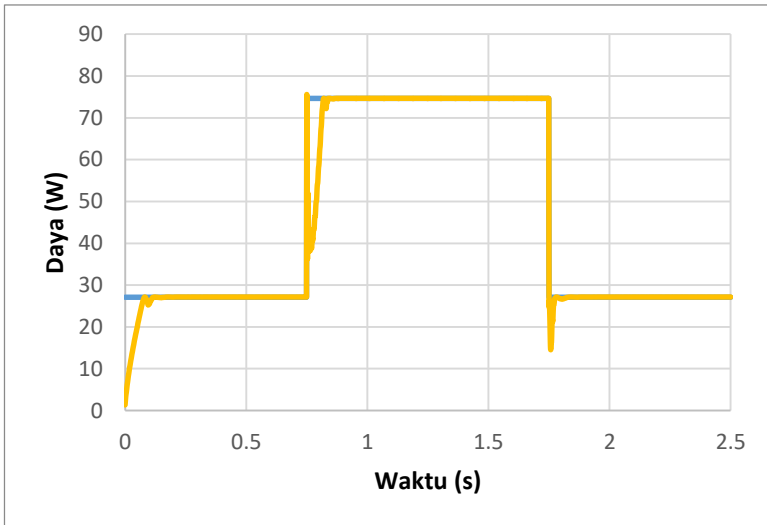
Gambar 3.7 Grafik *duty cycle* dengan algoritma *hill climbing*



Gambar 3.8 Grafik tegangan dengan algoritma *hill climbing*

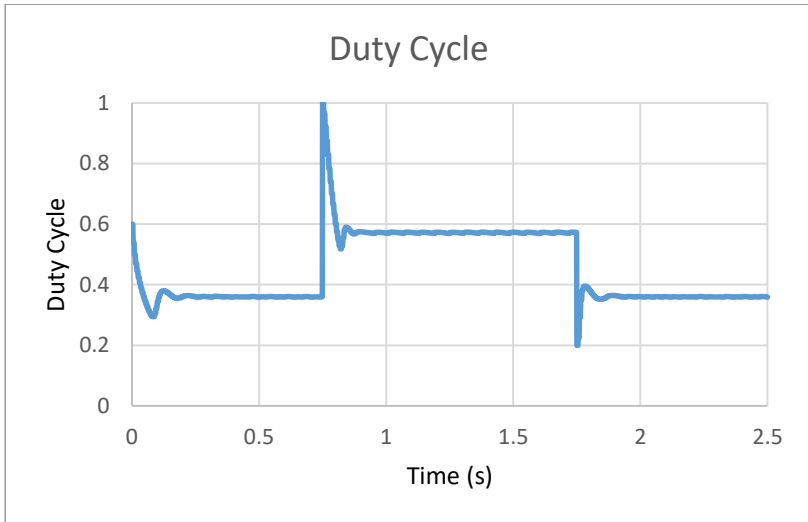
Berikutnya simulasi dilakukan pada algoritma Mod-Inc. Berdasarkan grafik pada gambar Gambar 2.1, *tracking* daya pada algoritma tersebut lebih cepat bila dibandingkan dengan algoritma *hill climbing*. Perbedaan yang tampak terjadi ketika iradiasi turun. Selain itu osilasi pada keadaan

steady state jauh lebih kecil bila dibanding dengan algoritma *hill climbing*. Dengan algoritma Mod-Inc, total energi yang dihasilkan oleh PV mencapai 112.71 Joule dengan energi maksimum yang sama yaitu 115.35 Joule sehingga energi yang didapat yaitu 97.8% dan energi yang hilang yaitu 2.2 %. Dengan algoritma ini, energi yang hilang lebih sedikit daripada dengan algoritma *hill climbing*.

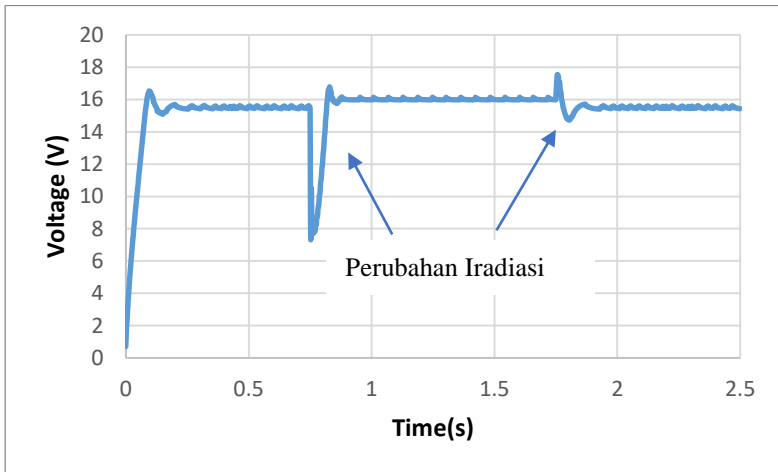


Gambar 3.9 Grafik daya dengan algoritma *modified incremental conductance*

Berdasarkan grafik *duty cycle*, osilasi tampak sangat kecil bila dibanding dengan algoritma *hill climbing*. Lonjakan nilai *duty cycle* terjadi ketika terdapat perubahan iradiasi, namun waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi *steady state* sangat singkat. Nilai *step* dari *duty cycle* dipengaruhi oleh nilai konduktansi. Nilai konduktansi ini dikalikan dengan konstanta tertentu (N) agar nilainya berada di rentang nilai *duty cycle*. Nilai N yang dipilih yaitu 0.075. Terlihat pada grafik, nilai *step* sangat besar pada awal proses *tracking* dan saat terjadi perubahan iradiasi sehingga perubahan *duty cycle* menjadi lebih cepat. Ketika mencapai titik MPP, nilai konduktansi semakin mengecil



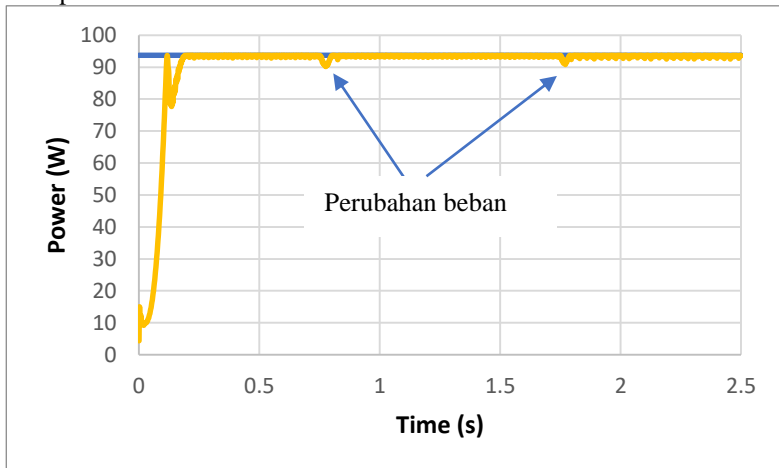
Gambar 3.10 Grafik *duty cycle* dengan algoritma *modified incremental conductance*.



Gambar 3.11 Grafik tegangan PV dengan algoritma *modified incremental conductance*

3.3.2 Simulasi Algoritma MPPT Iradiasi Tetap dan Beban Berubah

Simulasi berikutnya dilakukan dengan perubahan beban dan iradiasi tetap. Iradiasi dijaga konstan yaitu pada 1000 W/m^2 . Pada iradiasi tersebut, PV mampu menghasilkan daya maksimum sebesar 93.7 W . Beban yang digunakan berupa motor *brushless DC* (BLDC) menyerupai beban yang digunakan pada UAV. Pada simulasi perubahan beban ini, torsi motor dinaikkan dari 2 N.m lalu 2.5 N.m pada detik ke 1.75 lalu 3 N.m pada detik ke 2.75 .

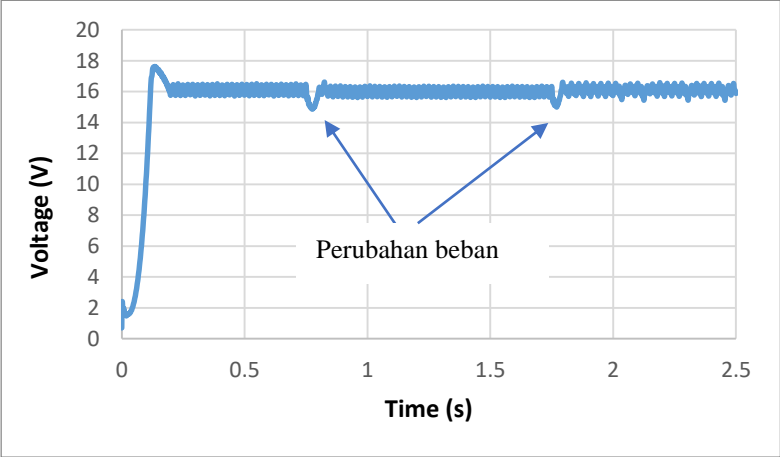


Gambar 3.12 Grafik daya terhadap perubahan beban dengan algoritma *hill climbing*

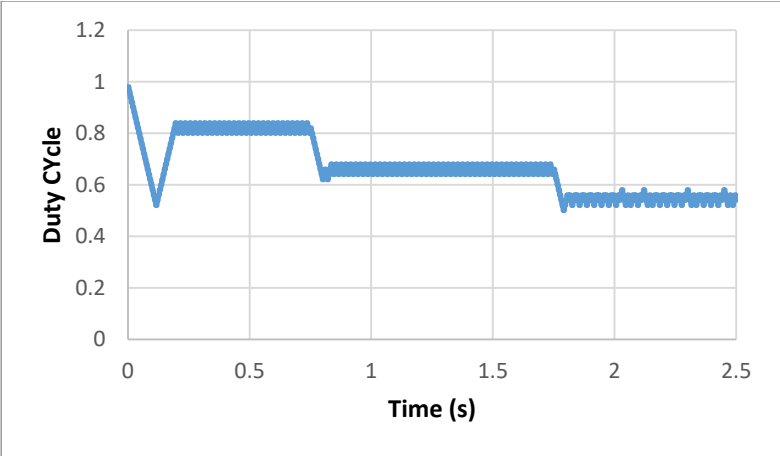
Dengan algoritma *hill climbing*, titik MPP dapat tercapai namun masih terdapat osilasi pada keadaan *steady state* seperti dalam percobaan sebelumnya. Energi total yang dihasilkan dari PV dengan algoritma ini yaitu 225.89 Joule sementara energi maksimum yang dapat dihasilkan PV yaitu 234.25 Joule . Dengan begitu efisiensi energi yang dicapai yaitu 96.44% dan jumlah energi yang hilang yaitu sebesar 3.56% .

Pada perubahan beban, hasil yang diharapkan yaitu bahwa daya masukan yang dihasilkan PV tetap konstan namun perubahan terjadi pada kecepatan motor BLDC. Ketika torsi dinaikkan, maka arus beban juga akan naik sehingga *duty cycle* akan turun. Sesuai grafik, nilai *duty cycle* semakin turun ketika arus beban naik. Karena iradiasi tetap, maka kurva

karakteristik juga tetap yang berarti titik operasi tegangan MPP juga tetap. Bila dilihat dari grafik, tegangan masukan tetap.



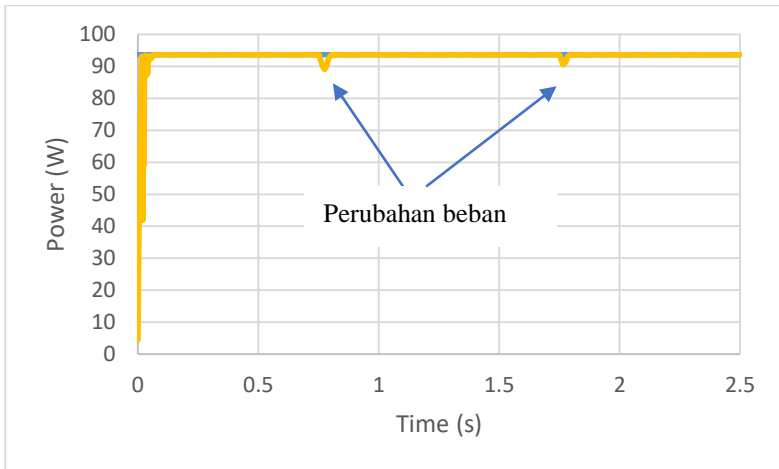
Gambar 3.13 Grafik tegangan PV terhadap perubahan beban dengan algoritma *hill climbing*



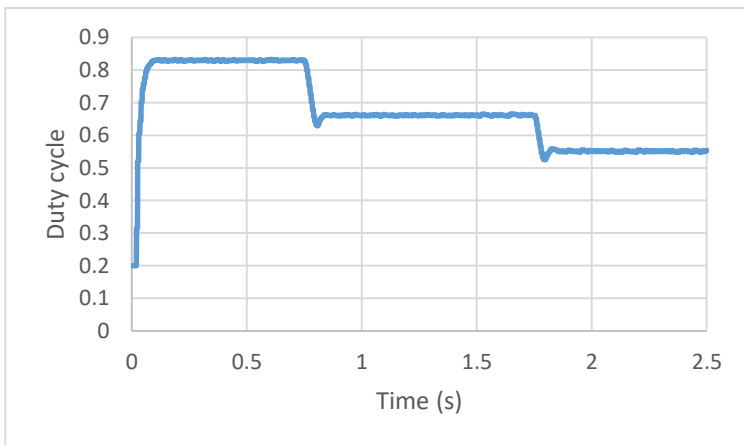
Gambar 3.14 Grafik *duty cycle* terhadap perubahan beban dengan algoritma *hill climbing*

Berikutnya pengujian perubahan beban dilakukan pada algoritma Mod-Inc. Dari grafik yang didapat, daya yang dihasilkan oleh PV dapat

mencapai MPP dengan osilasi yang kecil. Selain itu algoritma ini lebih responsif terhadap perubahan beban dibanding dengan algoritma *hill climbing*. Energi total yang dihasilkan PV dengan algoritma ini yaitu 233.04 Joule sedangkan energi maksimal yaitu 234.25 Joule sehingga efisiensi energi yang dicapai yaitu 99.49 % dan energi yang hilang hanya sebesar 0.51 %.

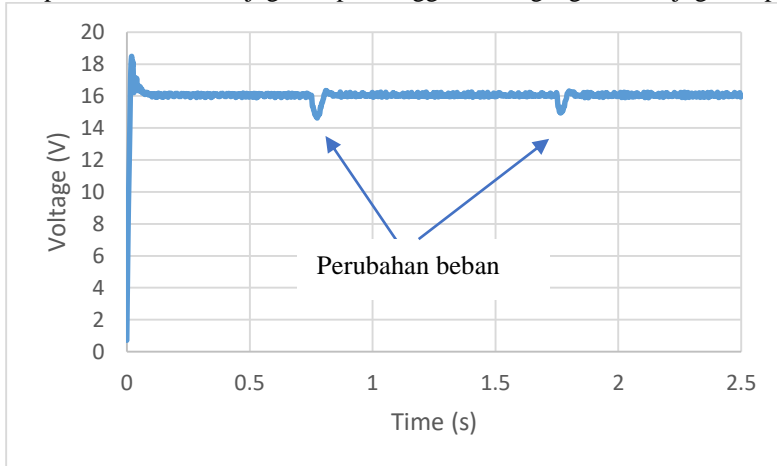


Gambar 3.15 Grafik daya terhadap waktu algoritma Mod-Inc



Gambar 3.16 Grafik *duty cycle* terhadap perubahan beban dengan algoritma Mod-Inc

Perubahan *duty cycle* pada algoritma Mod-Inc hampir sama dengan algoritma *hill climbing*, namun perubahan yang terjadi lebih cepat dan osilasi sangat kecil. Pada grafik tegangan, nilai tegangan input PV juga tetap karena iradiasi dijaga tetap sehingga nilai tegangan MPP juga tetap.

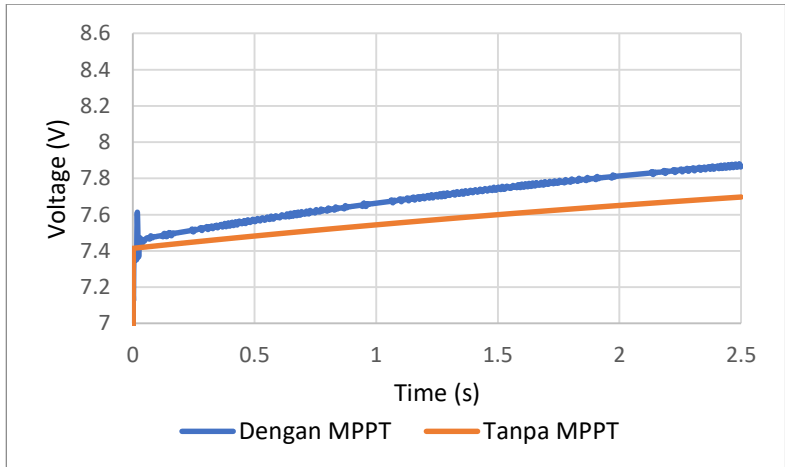


Gambar 3.17 Grafik tegangan terhadap perubahan beban dengan algoritma Mod-Inc

3.3.3 Simulasi MPPT pada Pengisian Baterai

PV pada UAV digunakan sebagai sumber untuk mengisi baterai. Baterai yang digunakan pada UAV berjenis *lithium-polymer* berjumlah 2 sel. Tegangan nominal baterai tersebut yaitu 8 V dengan tegangan minimum sebesar 7.4 V dan tegangan maksimum sebesar 8.4 V. Pada penelitian ini akan dibandingkan kecepatan pengisian baterai ketika PV dihubungkan langsung dengan baterai dan ketika MPPT digunakan di antara baterai dan PV.

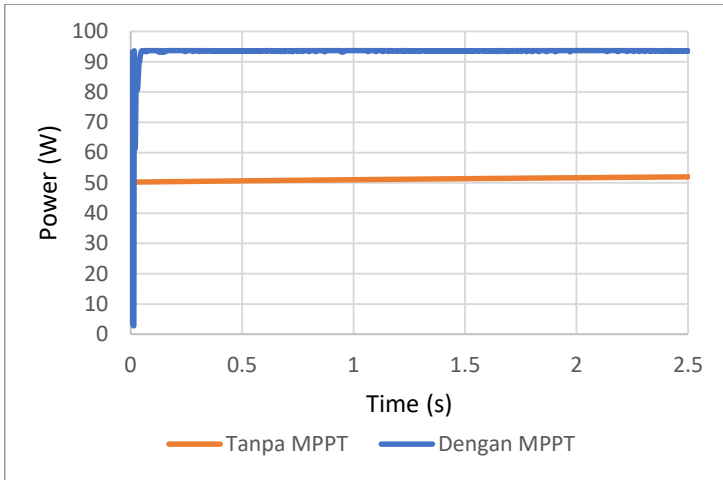
Pengujian dilakukan dengan menggunakan mensimulasikan baterai Li-Po yang di-charge menggunakan PV dengan MPPT. Algoritma Mod-Inc digunakan pada simulasi ini. Kecepatan pengisian baterai diamati dari kenaikan tegangan baterai dan nilai SOC (*state of charge*) pada akhir simulasi. Pada Gambar 3.18 Kenaikan tegangan baterai ketika menggunakan MPPT dan tanpa MPPT, tampak bahwa ketika baterai diisi dengan sumber PV melalui MPPT, tegangan mengalami kenaikan yang lebih cepat dibanding ketika tanpa MPPT.



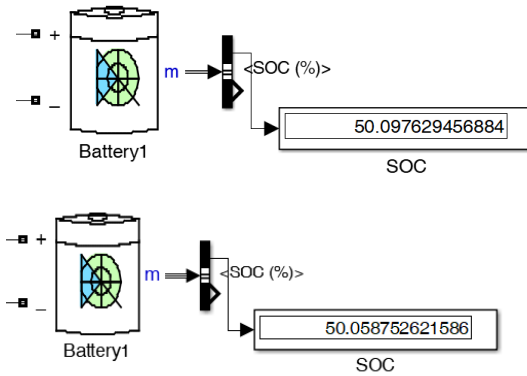
Gambar 3.18 Kenaikan tegangan baterai ketika menggunakan MPPT dan tanpa MPPT

Ketika menggunakan MPPT, pengisian baterai berlangsung lebih cepat. Hal ini dikarenakan daya yang masuk ke baterai lebih besar ketika menggunakan MPPT. Pada Gambar 3.19 tampak bahwa daya yang dihasilkan PV lebih besar ketika menggunakan MPPT.

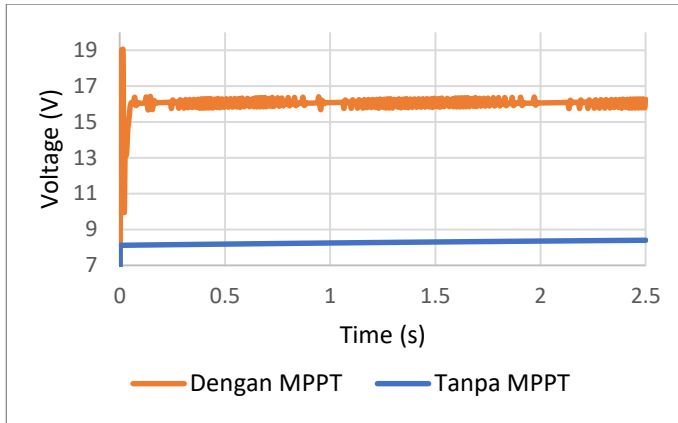
Perbedaan daya yang dihasilkan PV ini terjadi karena PV beroperasi pada tegangan yang berbeda ketika menggunakan MPPT dan tidak menggunakan MPPT. Berdasarkan kurva karakteristik PV pada subbab sebelumnya, daya maksimum PV pada iradiasi 1000 W/m^2 terjadi ketika tegangan operasi 16 V. Oleh karena itu, ketika MPPT digunakan, maka tegangan akan dikontrol pada daya maksimum dengan mengontrol *duty cycle* dari konverter. Namun ketika PV dihubungkan langsung dengan baterai, tegangan operasi PV akan sama dengan baterai dan selalu berubah mengikuti perubahan tegangan baterai. Tampak pada Gambar 3.21 Perbandingan tegangan PV dengan MPPT dan tanpa MPPT bahwa tegangan MPPT terjaga konstan pada tegangan MPP yaitu 16 V. Pada akhir simulasi nilai SOC baterai dengan MPPT adalah 50.097 % sementara tanpa MPPT adalah 50.0586 %.



Gambar 3.19 Perbandingan daya PV tanpa MPPT dan dengan MPPT



Gambar 3.20 SOC pada baterai dengan MPPT (atas) dan tanpa MPPT (bawah)

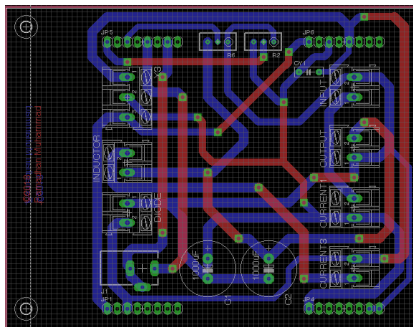


Gambar 3.21 Perbandingan tegangan PV dengan MPPT dan tanpa MPPT

3.4 Implementasi

3.4.1 Desain Rangkaian pada PCB

Tahap implementasi diawali dengan desain rangkaian pada PCB (*printed circuit board*). Desain dilakukan pada *software* EAGLE. Pertama dibuat rangkaian skematik yang diinginkan. Berikutnya dilakukan proses *routing* yang menyesuaikan ukuran jalur rangkaian dan ukuran rangkaian. Desain rangkaian ini dibuat menjadi dua lapisan untuk meminimalisir ukuran sehingga rangkaian nantinya dapat diletakkan di *body* UAV yang sempit.



Gambar 3.22 Proses desain PCB pada *software* EAGLE

3.4.2 Desain Induktor

Induktor yang digunakan pada rangkaian MPPT pada penelitian ini berjenis toroid. Induktor toroid memiliki beberapa kelebihan dibanding dengan jenis induktor lain yaitu ukurannya yang kecil dan ringan. Selain itu induktor toroid juga memiliki rugi-rugi magnetisasi yang kecil karena medan magnet cenderung mengisi bagian tengah dari induktor. Tipe inti induktor yang dipilih yaitu 0077548A7. Inti magnet tersebut memiliki nilai A_L sebesar 127 nH/T^2 .



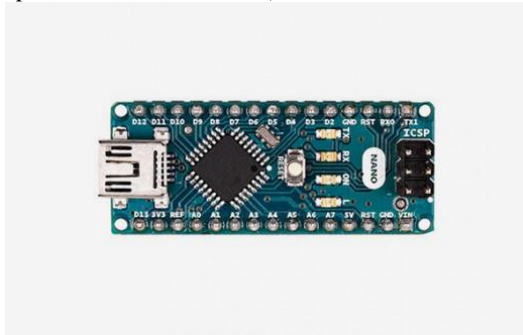
Gambar 3.23 Induktor tipe 0077548A7 (Sumber : <https://www.acalbf.com>)

Inti induktor akan dibelit dengan kawat email berjenis AWG. Berdasarkan *datasheet* jenis kawat tersebut, dibutuhkan 10 pilinan kawat dengan diameter 0.3 mm agar dapat menghantarkan arus hingga 8 A. Berdasarkan nilai A_L induktor yaitu 127 nH/T^2 maka jumlah belitan kawat yang dibelit pada inti yaitu 20 belitan.

3.4.3 Komponen-Komponen pada MPPT

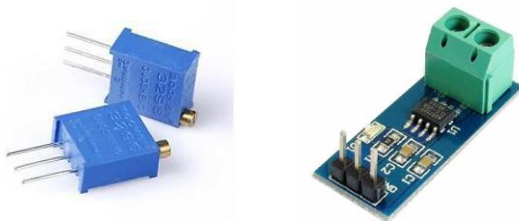
Komponen paling utama dari MPPT yaitu mikrokontroler. Mikrokontroler bertindak sebagai pemroses utama dari MPPT. Algoritma MPPT diimplementasikan pada mikrokontroler. Untuk mendapatkan performa yang baik maka perlu digunakan mikrokontroler yang cepat sehingga waktu eksekusi algoritma lebih singkat. Pada penelitian ini, dipilih mikrokontroler Arduino Nano. Mikrokontroler ini memiliki kelebihan yaitu ukurannya yang kecil dibanding dengan tipe Arduino yang lain. Ukurannya yang kecil ini sesuai untuk MPPT pada UAV. Mikrokontroler ini dilengkapi dengan prosesor ATMEGA 328. Arduino Nano memiliki kecepatan *clock* hingga 16 MHz. Mikrokontroler ini juga dilengkapi dengan fitur ADC (*Analog to Digital Converter*) sebesar 10 bit. Fitur ini sangat sesuai untuk pembacaan sinyal analog yang berasal

dari sensor yang digunakan. Selain itu, pada mikrokontroler ini terdapat 6 pin PWM (*pulse width modulation*).



Gambar 3.24 Arduino Nano (Sumber : <https://store.arduino.cc/>)

Algoritma MPPT memerlukan pembacaan arus dan tegangan, maka dari itu rangkaian MPPT juga dilengkapi dengan sensor arus dan tegangan. Sensor arus yang digunakan berjenis ACS712. Sensor arus ini mampu membaca arus AC maupun DC dan dapat dilewati arus hingga 30 A. Sensor ini bekerja pada tegangan yang sama dengan Arduino yaitu 5 V dan menghasilkan keluaran berupa tegangan yang dimasukkan ke bagian ADC mikrokontroler. Untuk sensor tegangan, digunakan potensiometer dengan nilai 100 k Ω . Sensor ini bekerja sebagai resistor pembagi tegangan. Rasio resistansi yang digunakan yaitu 1:10 sehingga setiap nilai 1 V akan terbaca sebesar 0.1 V pada mikrokontroler. Kedua sensor tersebut masing-masing dipasang pada bagian input dan output MPPT.



Gambar 3.25 Sensor tegangan dan arus pada MPPT

Komponen lain pada rangkaian MPPT yaitu komponen *switching*. Komponen *switching* yang digunakan berjenis MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*). MOSFET dipilih karena sesuai

untuk frekuensi *switching* yang tinggi. MOSFET juga memiliki efisiensi yang lebih tinggi bila dibanding dengan IGBT ketika dioperasikan pada tegangan rendah. Tipe MOSFET yang dipilih untuk rangkaian MPPT pada penelitian ini yaitu IRFP4332. Berdasarkan *datasheet* komponen ini, tegangan *switching* (V_{GS}) yang sesuai yaitu 15 V. Pada tegangan tersebut, kurva antara arus dan tegangan yang melewati MOSFET berbentuk linear hingga nilai arus 100 A. Karena tegangan *switching* lebih besar daripada tegangan mikrokontroler (15 V dengan 5 V) maka digunakan rangkaian *driver*.

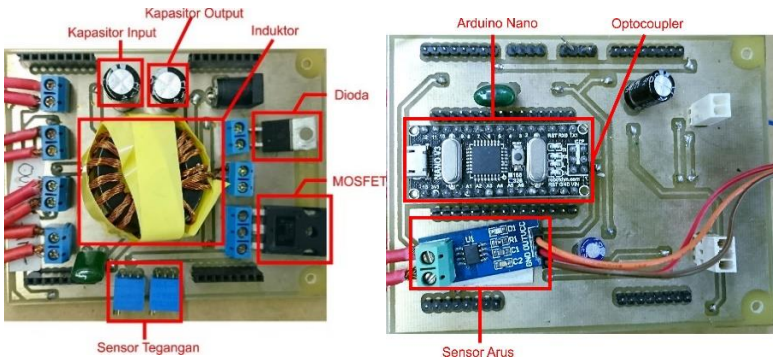


Gambar 3.26 Komponen *Optocoupler* FOD3182

Rangkaian *driver* untuk mengendalikan MOSFET menggunakan *optocoupler* berjenis FOD3182. *Optocoupler* ini disulai dengan suplai luar pada bagian outputnya. Sinyal PWM dari arduino dimasukkan ke bagian input. Kelebihan penggunaan *optocoupler* sebagai *driver* yaitu sifat input dan outputnya yang terisolasi. Hal ini dikarenakan *optocoupler* menggunakan cahaya untuk mentransmisikan sinyal dari bagian input ke output sehingga ketika terdapat gangguan seperti arus lebih atau hubung singkat pada bagian tegangan tinggi (output), bagian input tidak akan terganggu.

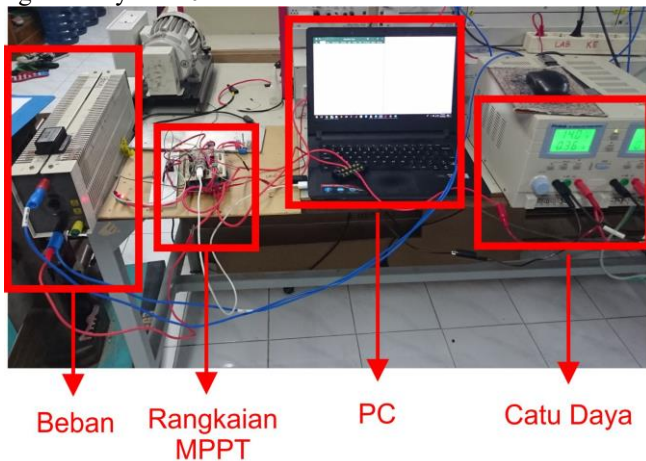
Komponen berikutnya yaitu dioda. Tipe dioda yang dipilih yaitu MUR 1560. MUR 1560 memiliki kemampuan hantar arus mencapai 15 A dan memiliki drop tegangan sebesar 1.2 V. Selain itu dioda tipe ini mampu menahan tegangan hingga 600 V. Pada implementasi, untuk menjaga kedua komponen tersebut agar tidak panas saat beroperasi, maka dipasang *heatsink*.

3.4.4 Pengujian Alat

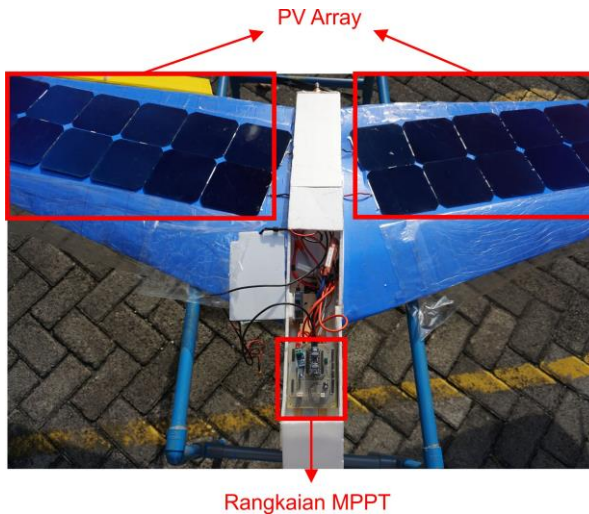


Gambar 3.27 Rangkaian MPPT *layer* bawah dan atas

Sebelum pengujian MPPT dilakukan, *buck converter* yang digunakan diuji terlebih dahulu untuk mengetahui karakteristiknya. *Buck converter* diuji dengan sumber tegangan dan beban resistif dengan daya sesuai daya PV. Dengan pengujian ini dapat diketahui efisiensi dari *buck converter* tersebut. Rangkaian yang sudah dibuat diuji langsung dengan PV pada UAV. Beban yang digunakan yaitu beban resistif yang berupa rheostat. Dengan beban rheostat, nilai resistansi dapat diubah-ubah. Nilai rheostat yang digunakan yaitu $10\ \Omega$.



Gambar 3.28 Pengujian efisiensi *buck converter*



Gambar 3.29 Pengujian MPPT pada UAV



Gambar 3.30 PV untuk mengukur nilai iradiasi

Pada pengujian perubahan iradiasi, pesawat diubah posisi kemiringannya menyerupai manuver pesawat saat terbang. Pengujian dilakukan pada jam 12.00 hingga 15.00 ketika posisi matahari berada di sisi barat. Pengujian dilakukan dengan menghadapkan pesawat ke arah matahari sehingga daya naik, lalu dikembalikan ke posisi semula

sehingga daya turun kembali. Berikutnya juga dilakukan pengujian pesawat terhadap perubahan beban. Setiap kali sebelum pengujian dilakukan, kurva karakteristik PV perlu didapatkan. Dengan begitu, dapat diketahui daya maksimum saat pengujian dilakukan. Untuk mendapatkan nilai iradiasi digunakan PV dengan daya kecil yang dihubungsingkatkan menggunakan sensor arus. Nilai arus yang terbaca dibagi dengan nilai hubung singkat pada *datasheet* lalu dikalikan dengan 1000 W/m^2 .

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Sensor Arus dan Tegangan

Akurasi sensor menjadi hal yang sangat penting pada MPPT. Algoritma MPPT bekerja mengandalkan sensor arus dan tegangan untuk *men-sensing* kondisi dari PV. Maka dari itu perlu dilakukan pengujian dan kalibrasi sensor sebelum diimplementasikan pada MPPT. Pertama dilakukan pengujian pada sensor tegangan. Sensor diberi tegangan dari 0 V hingga 20 V. Nilai yang terbaca sensor dibandingkan dengan nilai pada voltmeter digital CD 800A sebagai referensi. Dari hasil pengujian, sensor tegangan ini memiliki rata-rata akurasi yang cukup baik pada setiap tegangan yaitu 99 %.

Tabel 3 Data pengujian akurasi sensor tegangan

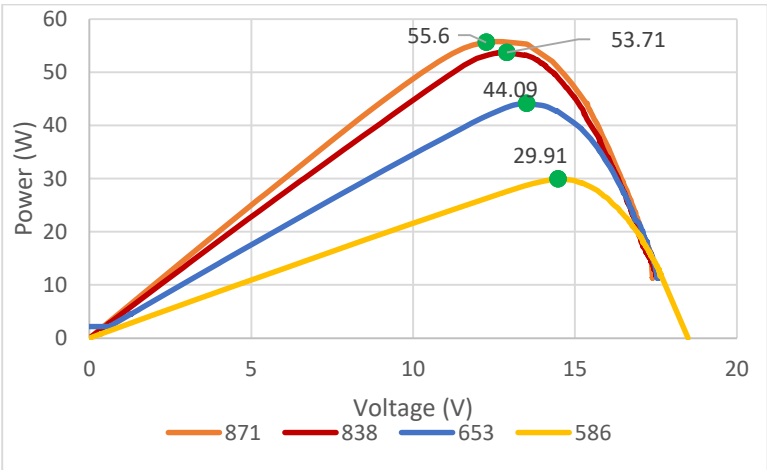
Nilai Aktual (V)	Nilai Sensor (V)	Akurasi (%)
0	0	100
1	1.16	99.84
2	2.03	99.98
3	3.07	99.97
4	4.04	99.99
5	5.06	99.98
6	5.99	99.99
7	6.93	99.99
8	7.96	99.99
9	8.96	99.99
10	9.97	99.99
11	10.98	99.99
12	11.75	99.97
13	13.4	99.96
14	14	100
15	14.95	99.99
16	15.95	99.99
17	17	100
18	18.07	99.99
19	19	100
20	20.5	99.97

Berikutnya dilakukan juga pengujian pada sensor arus ACS712. Nilai pembacaan pada sensor tersebut dibandingkan akurasinya dengan amperemeter digital Sanwa DCM22AD. Pengujian dilakukan dengan menghubungkan sensor dengan sumber arus. Sensor diberi arus dari 0 A hingga 3 A dan dibandingkan pembacaan nilai sensor dengan amperemeter.

Tabel 4 Data pengujian akurasi sensor arus

Nilai Aktual (A)	Nilai Sensor (A)	Akurasi (%)
0	0	100
0.5	0.4	99.8
1	0.9	99.9
1.5	1.5	100
2	1.9	99.95
2.5	2.38	99.95
3	2.9	99.97

4.2 Kurva Karakteristik PV



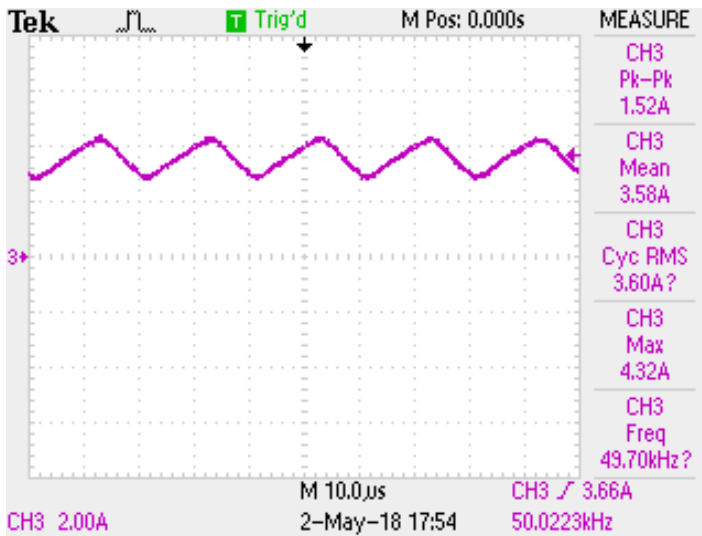
Gambar 4.1 Kurva karakteristik PV pada UAV dengan masing-masing P_{mpp}

Untuk mengetahui parameter daya maksimum PV (P_{mpp}), tegangan MPP (V_{mpp}), dan arus MPP (I_{mpp}), maka perlu diplot kurva karakteristiknya. Plot karakteristik PV ini dilakukan dengan menggunakan rheostat bernilai $25\ \Omega$. Nilai rheostat digeser dari $25\ \Omega$ hingga $0\ \Omega$ agar dapat mencakup semua nilai tegangan PV. Nilai tegangan dan arus yang didapat dibaca dengan sensor tegangan dan arus yang nilainya disimpan ke *logger*. Pengujian kurva karakteristik ini dilakukan pada iradiasi $871\ \text{W/m}^2$, $838\ \text{W/m}^2$, $653\ \text{W/m}^2$, dan $586\ \text{W/m}^2$. Suhu sel PV pada pengujian yaitu $57\ ^\circ\text{C}$.

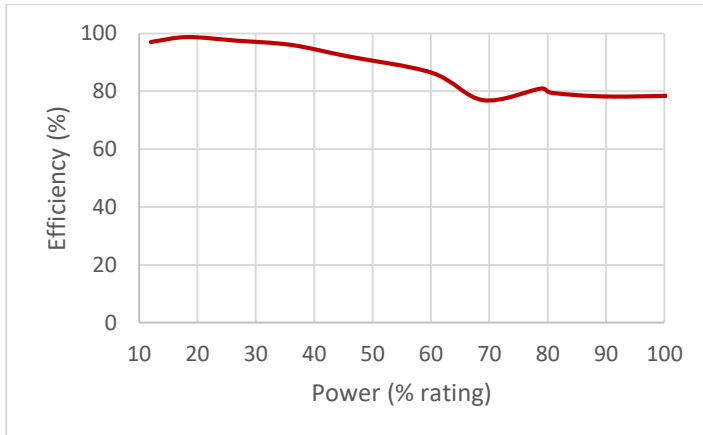
4.3 Pengujian Rangkaian *Buck Converter*

Rangkaian *buck* yang akan digunakan pada MPPT diuji terlebih dahulu untuk mengetahui apakah sudah dapat berfungsi sesuai yang diharapkan. Pengujian meliputi tes arus induktor dan pengujian efisiensi. Pengujian yang pertama yaitu pengujian arus induktor. Pengujian ini dilakukan untuk mengamati apakah arus yang melewati induktor bersifat CCM (*continous current mode*) pada frekuensi yang sudah ditentukan. CCM adalah kondisi arus di mana nilainya tidak pernah nol selama siklus *switching*. Pengujian ini dilakukan dengan mengoperasikan *buck converter* pada arus tertentu dan mengamati gelombang arusnya dengan osiloskop. Hasil pengujian tampak pada Gambar 4.2. Dapat diamati pada gambar tersebut bahwa arus pada induktor sudah bersifat CCM pada frekuensi yang sudah ditentukan yaitu ($50\ \text{kHz}$). Pada pengujian tersebut arus yang melewati induktor yaitu $3.58\ \text{A}$ dengan nilai *peak-to-peak* sebesar $1.52\ \text{A}$ sehingga *ripple factor* bernilai 40% .

Berikutnya yaitu pengujian efisiensi pada rangkaian *buck*. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui nilai efisiensi rangkaian di setiap nilai daya. Pengujian dilakukan dengan mengoperasikan rangkaian dari daya $10\ \text{W}$ hingga daya *rating*-nya yaitu $100\ \text{W}$. Tegangan input dijaga tetap yaitu sebesar $16\ \text{V}$ yang merupakan tegangan MPP pada PV yang digunakan sedangkan tegangan output dijaga tetap pada $12\ \text{V}$. Dengan mengubah nilai resistansi, maka didapatkan setiap daya yang diinginkan. Hasil pengujian tampak pada Gambar 4.3.



Gambar 4.2 Gelombang arus pada induktor



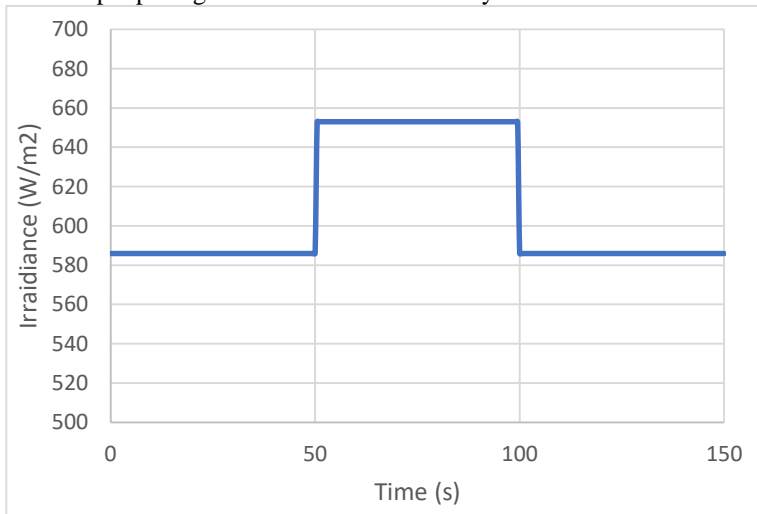
Gambar 4.3 Hasil pengujian efisiensi *buck converter*

Hasil pada Gambar 4.3 menunjukkan bahwa semakin besar daya yang dioperasikan pada rangkaian, semakin kecil nilai efisiensi. Penurunan nilai efisiensi ini disebabkan karena ketika daya semakin

besar, maka arus yang melewati rangkaian akan semakin besar. Arus ini akan menimbulkan rugi-rugi yang berupa panas pada setiap komponen.

4.4 Pengujian MPPT pada Perubahan Iradiasi

Pengujian perubahan iradiasi dilakukan dengan mengubah posisi kemiringan UAV. Pengujian dilakukan pada pukul 13.30 di mana sudut ketinggian matahari (*altitude angle*) kurang dari 90° . Pada kondisi tersebut ketika posisi UAV sejajar dengan tanah, maka PV pada UAV mendapatkan iradiasi yang lebih rendah dibanding ketika posisi UAV dimiringkan menghadap matahari. Dengan begitu, perubahan iradiasi dilakukan dengan menghadapkan UAV ke matahari. Pengubahan posisi ini juga merepresentasikan manuver pesawat ketika terbang. Untuk mendapatkan sudut kemiringan UAV yang sama pada setiap pengujian, digunakan sensor akselerometer yang diletakkan di atas UAV. Berdasarkan pengukuran, ketika posisi pesawat sejajar dengan tanah, iradiasi matahari bernilai 586 W/m^2 sedangkan ketika dihadapkan dengan matahari iradiasi bernilai 653 W/m^2 . Kurva karakteristik untuk setiap nilai iradiasi terdapat pada grafik di sub bab sebelumnya.

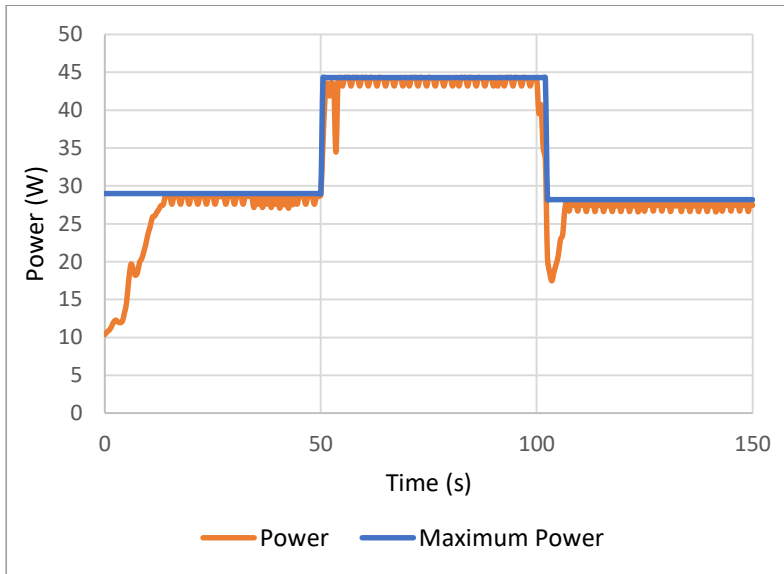


Gambar 4.4 Nilai iradiasi pada pengujian perubahan iradiasi

Grafik perubahan iradiasi tampak pada Gambar 4.4. Pada grafik tersebut tampak bahwa nilai iradiasi dinaikkan dari 586 W/m^2 menjadi 653 W/m^2 pada detik ke 50 dan diturunkan kembali ke 586 W/m^2 pada

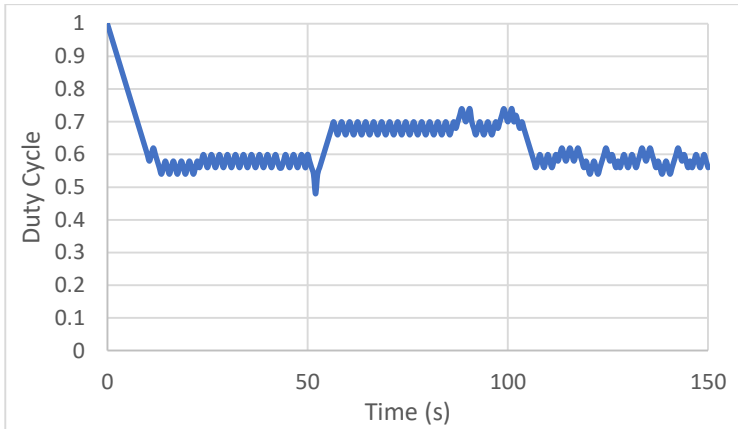
detik ke 100. Berdasarkan kurva karakteristik, daya maksimum ketika iradiasi bernilai 586 W/m^2 adalah 44.3 W sedangkan daya maksimum ketika 653 W/m^2 adalah 44.09 W . Pengujian seperti ini dilakukan agar dapat diamati respon MPPT ketika iradiasi naik maupun turun.

Pengujian pertama dilakukan dengan algoritma *hill climbing*. Nilai step yang digunakan yaitu 0.02 . Algoritma ini dapat merespon kenaikan dan penurunan iradiasi. Namun tampak pada Gambar 4.5 bahwa terdapat osilasi ketika daya maksimum sudah tercapai. Selain itu juga tampak bahwa respon MPPT pada penurunan iradiasi lambat. Pada pengujian tersebut total energi yang dicapai yaitu 94.6% dari energi maksimum sehingga terdapat sebesar 5.4% energi yang hilang.

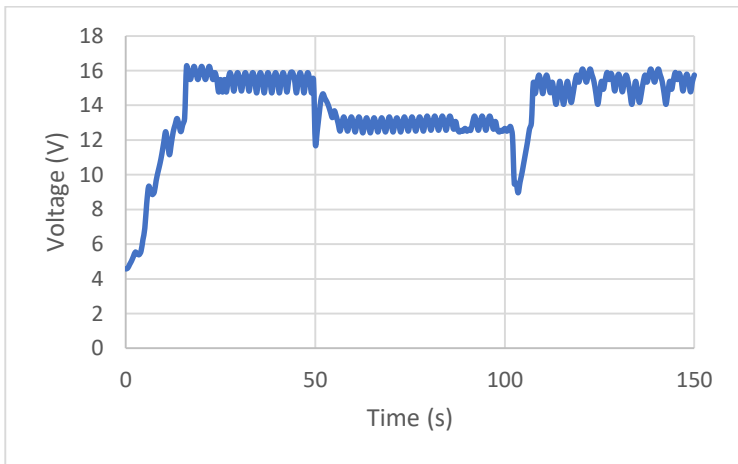


Gambar 4.5 Grafik daya PV dengan algoritma *hill climbing*

Pada grafik *duty cycle* Gambar 4.6 tampak bahwa MPPT merespon kenaikan iradiasi dengan kenaikan *duty cycle*. Perubahan tersebut mengakibatkan turunnya tegangan dari 15 V ke 13 V . Sesuai dengan kurva karakteristik, tegangan MPP turun ketika iradiasi berubah dari 586 W/m^2 ke 683 W/m^2 .



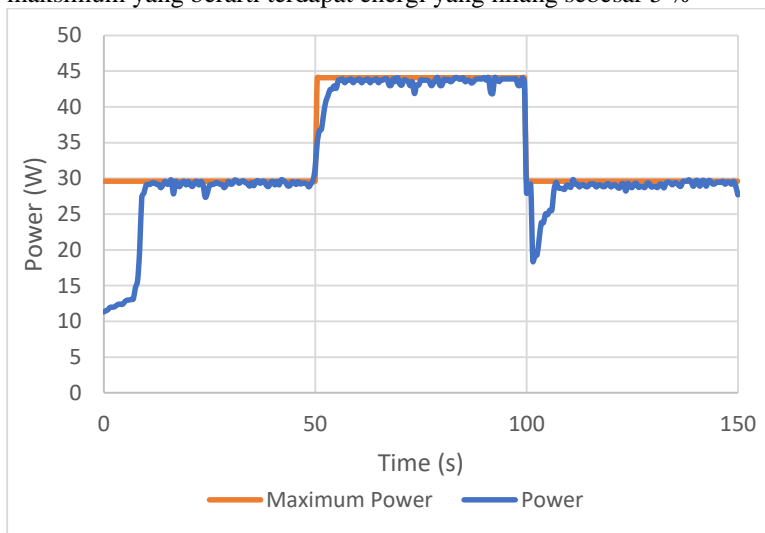
Gambar 4.6 Grafik *duty cycle* pada pengujian perubahan iradiasi dengan algoritma *hill climbing*



Gambar 4.7 Grafik tegangan input PV terhadap perubahan iradiasi dengan algoritma *hill climbing*

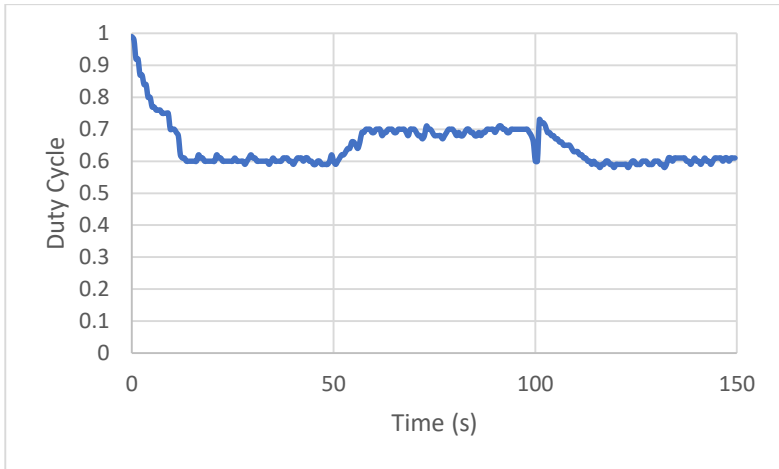
Berikutnya dilakukan pengujian dengan algoritma Mod-Inc. Pada pengujian digunakan konstanta N sebesar 0.04. Berdasarkan hasil pengujian yang tertera pada Gambar 4.8, MPPT dengan algoritma Mod-Inc memiliki performa yang lebih baik dibanding dengan algoritma *hill climbing*. Terlihat bahwa osilasi daya pada *steady state* lebih kecil. Energi

yang didapatkan PV dengan algoritma ini mencapai 95.04% dari energi maksimum yang berarti terdapat energi yang hilang sebesar 5 %

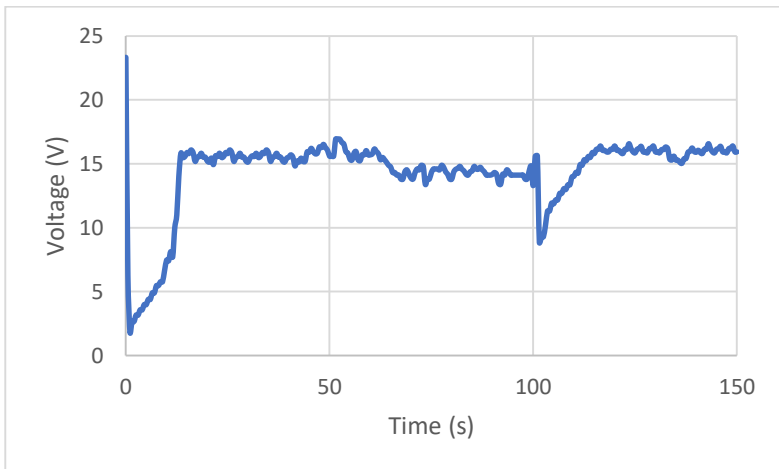


Gambar 4.8 Grafik daya PV terhadap perubahan iradiasi dengan algoritma Mod-Inc

Seperti pada pengujian dengan algoritma *hill climbing*, pada algoritma ini kenaikan iradiasi direspon oleh MPPT dengan menaikkan nilai *duty cycle*. Kenaikan *duty cycle* ini menyebabkan tegangan turun. Respon ini sesuai dengan kurva karakteristik pada sub bab sebelumnya, di mana tegangan MPP turun ketika iradiasi naik. Hasil tersebut membuktikan bahwa algoritma yang digunakan mampu mendeteksi perubahan MPP pada perubahan iradiasi.



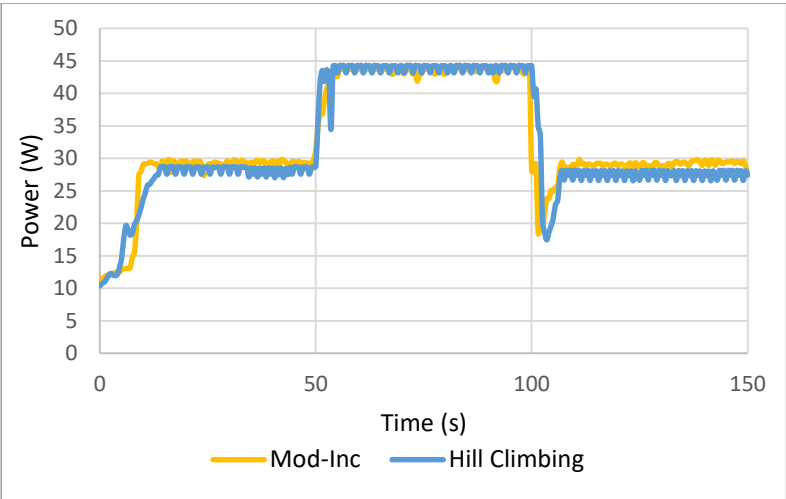
Gambar 4.9 Grafik *duty cycle* terhadap perubahan iradiasi dengan algoritma Mod-Inc



Gambar 4.10 Grafik tegangan PV pada perubahan iradiasi dengan algoritma Mod-Inc

Pada Gambar 4.11 respon kedua algoritma terhadap perubahan iradiasi dibandingkan. Tampak bahwa algoritma Mod-Inc, memiliki

respon yang lebih cepat daripada algoritma *hill climbing*. Selain itu, osilasi pada kondisi *steady state* juga lebih kecil.



Gambar 4.11 Perbandingan respon algoritma *hill climbing* dan Mod-Inc pada perubahan iradiasi

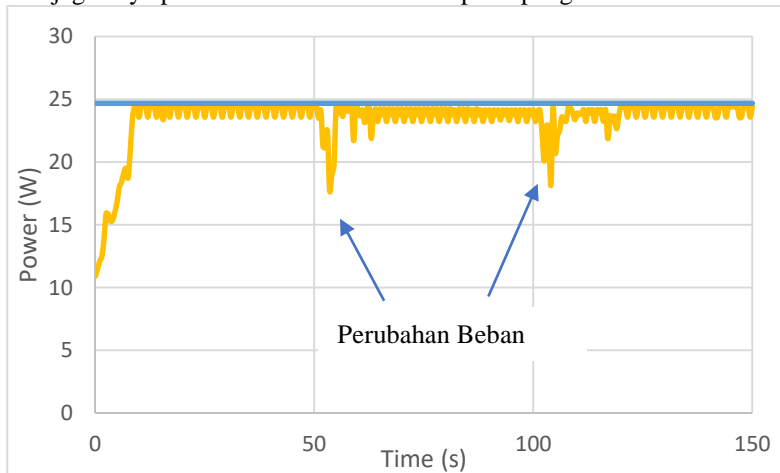
4.5 Pengujian MPPT pada Perubahan Beban



Gambar 4.12 Perubahan nilai resistansi pada pengujian perubahan beban

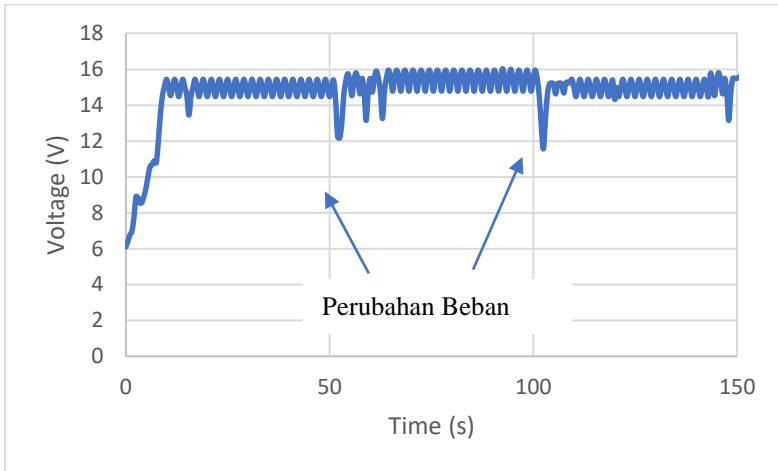
Perubahan beban dilakukan dengan mengubah resistansi dari beban yang digunakan yaitu rheostat. Resistansi diturunkan dari $3\ \Omega$ lalu turun menjadi $2\ \Omega$ pada detik ke 50 dan diturunkan lagi menjadi $1\ \Omega$ pada detik ke 100. Grafik nilai resistansi beban tampak pada Gambar 4.12. Nilai resistansi tersebut dipilih berdasarkan rentang nilai *duty cycle* di mana daya output dapat dijaga tetap.

Pertama dilakukan pengujian MPPT pada perubahan beban dengan algoritma *hill climbing*. Pada grafik daya, tampak bahwa daya input MPPT cenderung tetap. Daya yang tetap ini berarti bahwa MPPT dapat menjaga daya pada kondisi maksimum tanpa terpengaruh nilai beban.



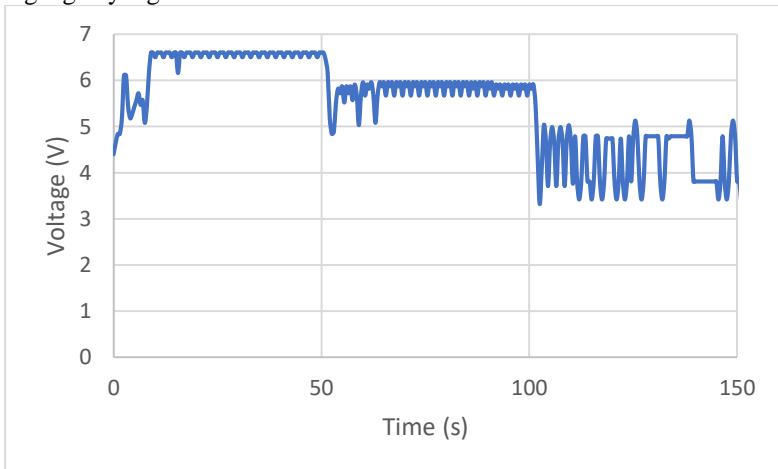
Gambar 4.13 Grafik daya terhadap perubahan beban algoritma *hill climbing*

Berdasarkan data yang didapat, algoritma *hill climbing* dapat menjaga daya tetap pada perubahan beban. Namun ketika terjadi perubahan beban tampak bahwa algoritma tersebut membutuhkan waktu yang cukup lama untuk mencapai *steady state*. Selain itu juga terdapat osilasi yang cukup besar. Dengan algoritma ini, bila dibandingkan dengan energi maksimum PV pada iradiasi, efisiensi PV yaitu 95.01 % sehingga terdapat kehilangan daya sebesar 4.99 %.

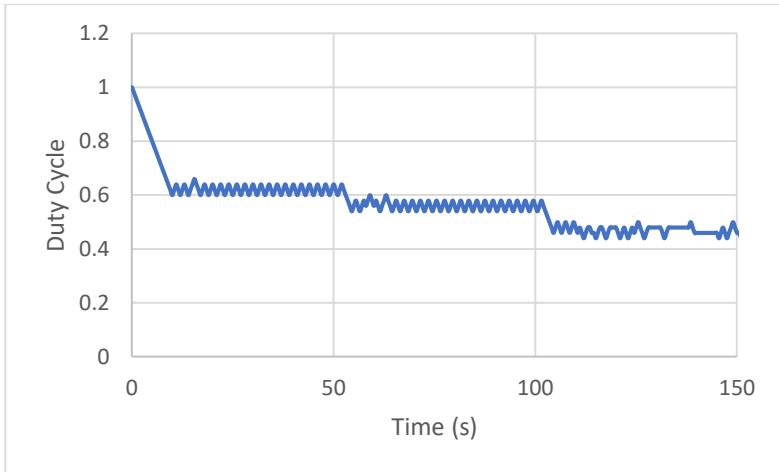


Gambar 4.14 Tegangan input MPPT pada perubahan beban *hill climbing*

Grafik menunjukkan bahwa tegangan input pada PV cenderung tetap. Hal ini dikarenakan MPPT dapat menjaga nilai tegangan PV tetap pada tegangan di mana dayanya maksimum. Sementara itu, tegangan output turun mengikuti nilai *duty cycle*. Hal ini dikarenakan untuk mencapai daya yang sama, dengan resistansi yang lebih rendah maka dibutuhkan tegangan yang lebih rendah.

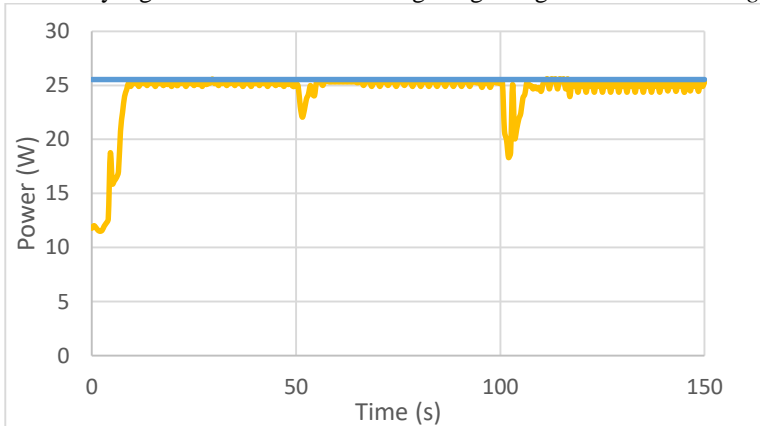


Gambar 4.15 Tegangan output MPPT saat perubahan beban

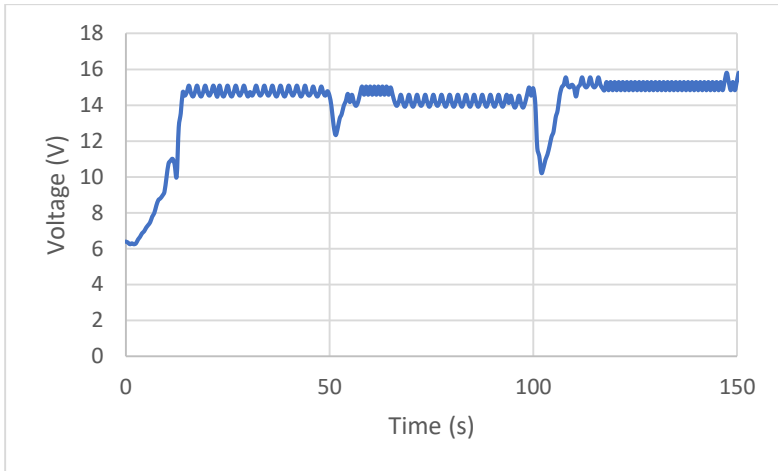


Gambar 4.16 Perubahan nilai *duty cycle* terhadap perubahan beban algoritma *hill climbing*

Pengujian berikutnya dilakukan dengan algoritma Mod-Inc. Dengan algoritma ini, osilasi pada *steady state* lebih kecil dan respon terhadap perubahan beban juga lebih cepat. Efisiensi energi yang didapat dengan algoritma ini mencapai 95.6 % yang berarti terdapat sebanyak 4.4 % energi yang hilang. Pada perubahan beban terbukti algoritma ini memiliki efisiensi yang lebih baik bila dibanding dengan algoritma *hill climbing*.

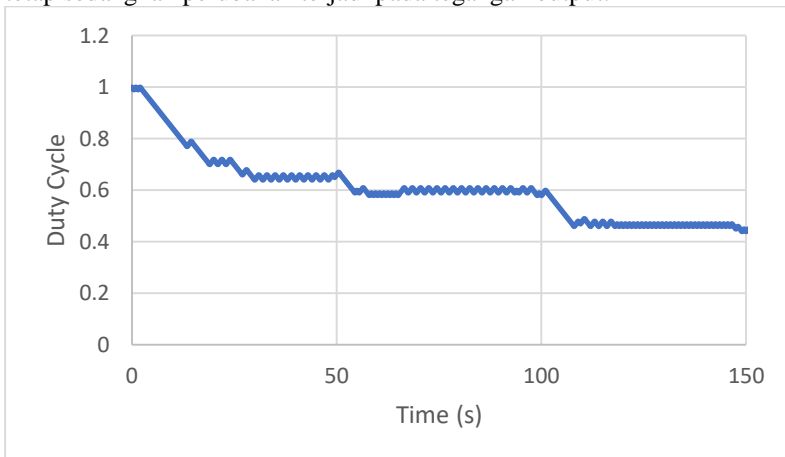


Gambar 4.17 Grafik daya terhadap perubahan beban algoritma Mod-Inc

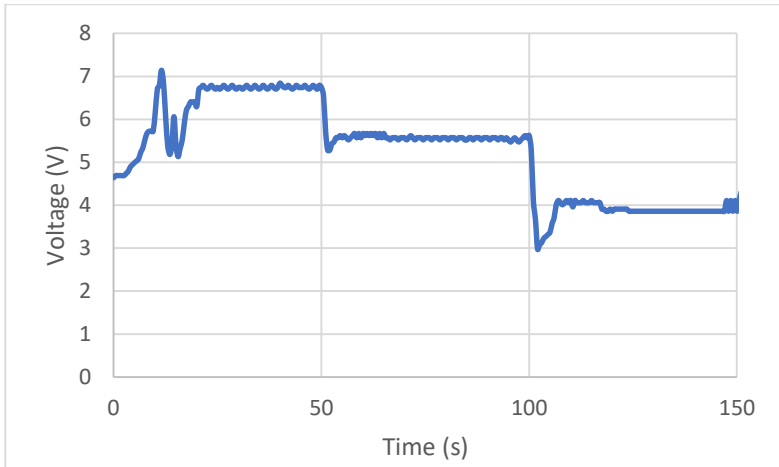


Gambar 4.18 Grafik tegangan PV terhadap perubahan beban dengan algoritma Mod-Inc

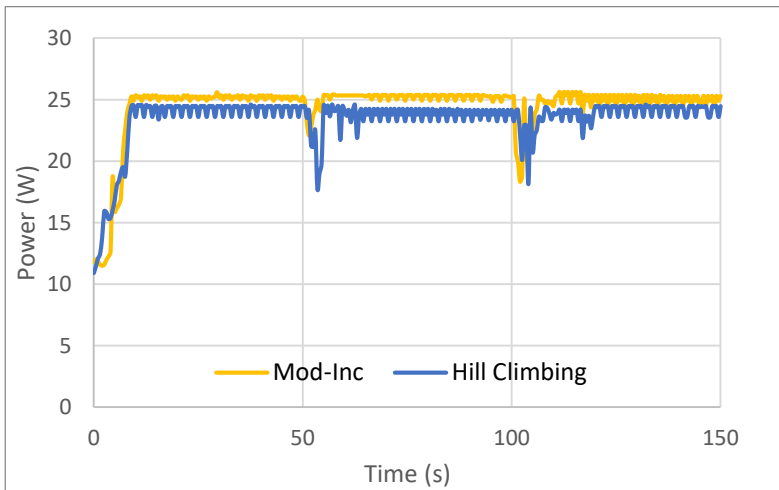
Pada grafik *duty cycle* tampak bahwa osilasi lebih kecil bila dibanding dengan algoritma *hill climbing*. Selain itu respon terhadap perubahan beban juga lebih cepat. MPPT menjaga agar tegangan input tetap sedangkan perubahan terjadi pada tegangan output.



Gambar 4.19 Grafik *duty cycle* terhadap perubahan beban dengan algoritma Mod-Inc



Gambar 4.20 Grafik tegangan output MPPT terhadap perubahan beban dengan algoritma Mod-Inc



Gambar 4.21 Perbandingan grafik daya terhadap waktu algoritma Mod-Inc dengan *hill climbing* pada pengujian perubahan beban

Perubahan tegangan terjadi di bagian output MPPT. Ini dikarenakan untuk mencapai daya yang sama, dengan resistansi yang lebih rendah maka dibutuhkan tegangan yang lebih rendah. Sesuai dengan grafik, ketika resistansi diturunkan maka tegangan juga akan turun.

Perbedaan respon daya terhadap waktu kedua algoritma terdapat pada Gambar 4.21. Tampak pada grafik bahwa algoritma Mod-Inc memiliki respon yang lebih cepat terhadap perubahan beban. Terdapat perbedaan daya maksimum yang dicapai oleh kedua algoritma. Hal ini dikarenakan pengujian pada kedua algoritma dilakukan pada kondisi iradiasi yang sedikit berbeda. Oleh karena itu, pada perhitungan efisiensi energi, total energi yang didapat dibandingkan dengan daya maksimum yang berbeda.

4.6 Perbandingan Simulasi dengan Implementasi

Pada implementasi terdapat beberapa perbedaan bila dibanding dengan simulasi. Salah satu perbedaan yaitu pada efisiensi energi yang dicapai oleh kedua metode. Perbedaan ini dikarenakan pada saat pengujian pada alat, kondisi lingkungan seperti iradiasi, suhu, dll tidak dapat dijaga tetap seperti pada simulasi. Namun dari hasil simulasi dan implementasi menunjukkan bahwa algoritma Mod-Inc memiliki efisiensi *tracking* yang lebih baik bila dibanding dengan algoritma *hill climbing*. Pada Tabel 5, tampak perbandingan simulasi dan implementasi masing-masing efisiensi energi pada tiap pengujian. Nilai yang tertera merupakan hasil pengujian yang sudah dibahas di subbab sebelumnya.

Tabel 5 Perbandingan simulasi dan implementasi MPPT

	Perubahan Iradiasi		Perubahan Arus Beban	
	<i>Hill Climbing</i>	Mod-Inc	<i>Hill Climbing</i>	Mod-Inc
Simulasi	96.13 %	97.80%	95.44 %	99.49 %
Implementasi	94.6 %	95.04 %	95.01 %	95.6 %

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan analisis, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Algoritma Mod-Inc memiliki respon yang lebih baik daripada algoritma *hill climbing* pada perubahan iradiasi yang cepat.
2. Algoritma Mod-Inc memiliki respon yang lebih baik daripada algoritma *hill climbing* pada perubahan beban.
3. Pengisian baterai dengan PV berlangsung lebih cepat dengan menggunakan MPPT dibanding dengan tanpa MPPT
4. Perbandingan simulasi dan implementasi menunjukkan bahwa pada simulasi efisiensi energi yang dicapai lebih baik. Hal ini disebabkan karena adanya *noise* yang besar pada implementasi. Selain itu pada simulasi, setiap komponen yang digunakan bersifat ideal.

5.2 Saran

1. Pengujian MPPT sebaiknya dilakukan dengan menggunakan PV simulator agar kondisi pengujian dapat dijaga konstan.
2. Sebaiknya digunakan komponen SMD agar dimensi alat lebih kecil dan ringan.
3. Sensor yang digunakan pada MPPT sebaiknya lebih akurat dan presisi agar algoritma dapat bekerja dengan lebih optimal.
4. Konverter sebaiknya ditambah konfigurasi satu sumber agar tidak diperlukan sumber luar
5. Pengujian beban sebaiknya menggunakan motor yang beban mekaniknya dapat diubah-ubah

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Mekhilef, R. Saidur, and A. Safari, "A review on solar energy use in industries," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 4, pp. 1777–1790, 2011.
- [2] Jaw-Kuen Shiau, Der-Ming Ma, Pin-Ying Yang, Geng-Feng Wang, and Jhij Hua Gong, "Design of a Solar Power Management System for an Experimental UAV," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 45, no. 4, pp. 1350–1360, 2009.
- [3] D. K. Chy and M. Khaliluzzaman, "Experimental assessment of PV arrays connected to Buck-Boost converter using MPPT and Non-MPPT technique by implementing in real time hardware," *Proc. 2015 3rd Int. Conf. Adv. Electr. Eng. ICAEE 2015*, pp. 306–309, 2016.
- [4] J. Ma *et al.*, "Insight of Direct Search Methods and Module-Integrated Algorithms for Maximum Power Point Tracking (MPPT) of Stand-Alone Photovoltaic Systems," *Netw. Parallel Comput.*, vol. 7513, pp. 463–471, 2012.
- [5] J. Ahmad, "A fractional open circuit voltage based maximum power point tracker for photovoltaic arrays," *Softw. Technol. Eng. (ICSTE), 2010 2nd Int. Conf.*, vol. 1, pp. 247–250, 2010.
- [6] H. Patel and V. Agarwal, "Maximum power point tracking scheme for PV systems operating under partially shaded conditions," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 4, pp. 1689–1698, 2008.
- [7] K. H. Hussein, "Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions," *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, vol. 142, no. 1, p. 59, 1995.

- [8] S. Qin, M. Wang, T. Chen, and X. Yao, "Comparative Analysis of Incremental Conductance and Perturb-and-Observation Methods to Implement MPPT in Photovoltaic System," pp. 5792–5795, 2011.
- [9] A. Morales-Acevedo, J. L. Diaz-Bernabe, and R. Garrido-Moctezuma, "Improved MPPT adaptive incremental conductance algorithm," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 5540–5545, 2014.
- [10] B. Hauke, F. Buck, and C. Power, "Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage Basic Configuration of a Buck Converter," no. December 2011, pp. 1–8, 2015.
- [11] B. Nayak, A. Mohapatra, and K. B. Mohanty, "Selection criteria of dc-dc converter and control variable for MPPT of PV system utilized in heating and cooking applications," *Cogent Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–16, 2017.

LAMPIRAN

1. Program MPPT Modified Incremental Conductance:

```
void convertAmpandVolt()
{
    rawSampleAmp = 0;
    for(int i = 0; i<iteration; i++)
    {
        rawValueAmp = analogRead(A5);
        rawSampleAmp = rawValueAmp +rawSampleAmp;

        rawValueAmp2 = analogRead(A3);
        rawSampleAmp2 = rawValueAmp2 +rawSampleAmp2;

        rawValueVolt = analogRead(A0);
        rawSample = rawValueVolt + rawSample;

        rawValueVolt2 = analogRead(A2);
        rawSample2 = rawValueVolt2 + rawSample2;
    }
    rawSampleAmp = rawSampleAmp/iteration;
    rawSampleAmp2 = rawSampleAmp2/iteration;

    voltageAmp = (rawSampleAmp / 1023.0) * 5000.0;//(double)Vsupp;
    iSense = ((voltageAmp - acoffset) / mVperAmp);

    voltageAmp2 = (rawSampleAmp2 / 1023.0) * 5000;
    iSense2 = ((voltageAmp2 - acoffset2) / mVperAmp2);

    rawSample = rawSample / iteration;
    vSense = (rawSample / 1023.0) * (double)Vsupp * 0.01;

    rawSample2 = rawSample2 / iteration;
    vSense2 = (rawSample2 / 1023.0) * 5000 *0.01;
```

```

power2 = iSense2*vSense2;
if (iSense < 0) iSense = 0;
if (iSense2 < 0) iSense2 = 0;

}
int iter = 100;
float co = 0.050;
double conductance;
void pno()
{
    convertAmpandVolt();
    power = vSense*iSense;
    dp = power - p0;
    dv = vSense - v0;
    di = iSense - i0;
    conductance = co*((di/dv)+(iSense/vSense));
    if(dv!=0)
    {
        if (abs(conductance)<0.002)
        {
            incStep=0;
        }
        else
        {
            if (conductance<0)
            {
                co = 0.055;
                incStep = co*((di/dv)+(iSense/vSense));
            }
            else if (conductance>0)
            {
                co = 0.02;
                incStep = co*((di/dv)+(iSense/vSense));
            }
        }
    }
    disp();
    if(abs(dv)>=0.03)
    {

```

```

    if (di!=0)
    {
        duty = duty-incStep;
    }
    else
    {
        duty = duty -0;
    }
}

else
{
    duty = duty-incStep;
}

timee = timee+1;

OCR1A = (duty)*160;
v0 = vSense;
p0 = power;
i0 = iSense;
if (duty>0.99) duty = 0.99;
if(duty<0.1) duty = 0.1;
}

void setup() {
    init_PWM();
    Serial.begin(9600);
}

void loop() {
    pno();
    ICR1 = 160;
}

```

2. Program Simulasi MATLAB

```
function dutyOut      = inc(Vsense,Isense,T)
persistent dV dI I0 V0 duty n SC p p0 dp
dStep

if isempty(I0)
    I0=0;
end

if isempty(dStep)
    dStep=0.005;
end

if isempty(p)
    p=0;
end

if isempty(p0)
    p0=0;
end

if isempty(dp)
    dp=0;
end

if isempty(V0)
    V0=0;
end

if isempty(n)
    n= 0.075; %work good 0.075;
end

if isempty(duty)
    duty=0.8;
end

if isempty(SC)
    SC=0.00025;
```



```

end

dV= Vsense-V0;
dI= Isense-I0;

if duty<=1
    p = Vsense * Isense;
    dV= Vsense-V0;
    dI= Isense-I0;
    dp = p - p0;
    dStep = n * ((dI/dV)+(Isense/Vsense));
    disp([(dI/dV)+(Isense/Vsense) duty]);
    if dV==0
        if dI==0
            duty = duty+0;
        else
            duty = duty-(dStep);
        end
    else
        duty = duty-(dStep);
    end
end

if duty>1
    duty = 1 ;
end
if duty<0.2
    duty = 0.2;
end
V0 = Vsense;
I0 = Isense;
p0 = p;
end
dutyOut = duty;
end

```

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Ramadhan Muhammad Hakim lahir dan dibesarkan di Malang sejak 22 tahun lalu. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDN Kauman I Malang pada tahun 2008. Setelah itu, penulis melanjutkan pendidikan di SMPN I Malang dan SMAN 3 Malang. Setelah lulus jenjang SMA, penulis melanjutkan ke jenjang perguruan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember melalui jalur SBMPTN. Pada masa perkuliahan penulis banyak menghabiskan waktu di bidang robotika. Penulis menjadi asisten laboratorium Konversi Energi sejak semester 6. Pernah menjadi bagian di Tim Barunastra ITS sebagai programmer. Suka makanan pedas dan menonton film bergenre *thriller*. Penulis bercita-cita bekerja di perusahaan aviasi dan tinggal di Amsterdam.